

Grado en Ingeniería Mecánica

2018-2019

Trabajo Fin de Grado

Diseño y cálculo estructural del alerón trasero de un vehículo deportivo.

Carlos Martínez Armendáriz

Tutor

Enrique Barbero Pozuelo

Leganés, julio de 2019



Esta obra se encuentra sujeta a la licencia Creative Commons **Reconocimiento – No Comercial – Sin Obra Derivada**

Agradecimientos

A mi tutor, Enrique Barbero Pozuelo, por darme la oportunidad de realizar este trabajo, por su ayuda y consejos.

A mi familia, especialmente a mis padres, Francisco y Carmen, y a mi hermano, Íñigo, por estar siempre presentes en los momentos difíciles.

A todos mis amigos presentes en esta etapa. Especialmente a Marta F. por creer siempre en mí y a Álvaro N. por ser un ejemplo a seguir y por su apoyo diario.

Índice

Índice	V
Índice de figuras.	VIII
Índice de tablas.	XI
Capítulo 1. Introducción.	1
1.1 Motivación.	1
1.2 Objetivos.	3
1.3 Estructura del documento.	4
Capítulo 2. Antecedentes.	5
2.1 Vehículo GT.	5
2.2 Diferencias entre vehículo GT y uno comercial.	5
2.3 Introducción sobre competición GT. WEC.	7
2.4 Categorías WEC.	8
2.5 Blancpain Series GT	10
2.6 Reglamento Blancpain	11
2.6.1 Reglamento referido a los parámetros de diseño.	11
2.6.2 Reglamento referido a las condiciones estructurales.	12
2.7 Circuitos.	12
2.8 Vehículos que participan.....	14
2.9 Alerón	15
2.9.1 Perfil alar	15
2.9.2 Historia alerones.....	16
2.10 Aerodinámica.	19

2.10.1 Fuerzas aerodinámicas.	19
2.10.2 Principios físicos.	23
Capítulo 3. Parámetros de diseño del alerón	27
3.1 Elección del vehículo.	27
3.1.1 Características del vehículo.	27
3.2 Selección del perfil aerodinámico.	28
3.3 Selección parámetros geométricos.	30
3.3.1 Introducción.	30
3.3.2 Cálculo de la cuerda Audi TTS	36
3.3.3 Cálculo de la envergadura Audi TTS	39
3.3.4 Dimensiones finales.	42
Capítulo 4. Diseño alerón.	43
4.1 SolidWorks.	43
4.2 Aspectos generales de los diseños realizados.	44
4.3 Primer modelo.	46
4.4 Segundo modelo.	47
4.5 Tercer modelo.	49
4.6 Cuarto modelo.	50
4.7 Diseño completo del alerón.	51
Capítulo 5. Modelo numérico.	53
5.1 Método de elementos finitos. MEF.	53
5.1.1 Introducción	53
5.1.2 Fases del cálculo MEF. Funcionamiento de un programa de elementos finitos.	55
5.2 Descripción del modelo numérico.	56
5.2.1 Pre-mallado y mallado.	57
5.2.2 Material empleado.	58
5.2.3 Cargas aplicadas	59
5.2.4 Restricciones cinemáticas	65
Capítulo 6. Análisis estructural.	67

6.1 Modelos analizados.....	67
6.2 Simulación del primer modelo.....	68
6.3 Simulación del segundo modelo	72
6.4 Simulación del tercer modelo.	77
6.5 Simulación del cuarto modelo.	80
6.6 Comprobación reglamento.....	82
6.7 Cambio de material.....	83
6.7.1 Modelo definitivo fabricado en aluminio.....	84
6.7.2 Modelo definitivo fabricado en material compuesto.....	86
Capítulo 7. Presupuesto.	91
7.1 Introducción.	91
7.2 Licencias de software y equipo.....	91
7.3 Coste mano de obra.....	92
7.4 Presupuesto total del proyecto.	93
Capítulo 8. Conclusiones y trabajos futuros.....	95
8.1 Resumen y conclusiones.....	95
8.2 Trabajos futuros.	97
Bibliografía.....	99
Anexo 1.	101
Anexo 2	103

Índice de figuras.

Figura 1. BMW M6	1
Figura 2. BMW M6 GT3.....	2
Figura 3. Modelo LMP	9
Figura 4. Modelo GTE	9
Figura 5. Elementos de un perfil alar.	15
Figura 6. Primer alerón montado en un vehículo por Michael May en su Porsche 550 Spider.....	17
Figura 7. Jim Hall pilotando su Chaparra 2E	18
Figura 8. Fuerzas aerodinámicas sobre un avión.....	19
Figura 9. Fuerzas aerodinámicas alerón automóvil.	20
Figura 10. Coeficiente sustentación - ángulo ataque.....	21
Figura 11. Coeficiente de resistencia-ángulo de ataque.	22
Figura 12. Coeficiente de resistencia al avance.....	22
Figura 13. Ecuación de continuidad.	24
Figura 14. Efecto Venturi.	25
Figura 15. Ejemplo perfil alar alerón.	25
Figura 16. Vista lateral con medidas Audi TTS. [14]	27
Figura 17. Vista frontal con medidas Audi TTS. [14].....	28
Figura 18. Perfil alar Ch 10. 300mm de cuerda.....	30
Figura 19. Vista lateral Porsche 911 GT3 RS. Medidas reales batalla y longitud del vehículo. [16].....	32
Figura 20. Vista trasera Porsche 911 GT3 RS. Medidas reales anchura y altura del vehículo. [16].....	33
Figura 21. Vista planta Porsche 911 GT3 RS. Medida cuerda alerón y longitud total del vehículo. [16].....	33
Figura 22. Vista trasera Porsche 911 GT3 RS. Medida anchura vehículo.	34
Figura 23. Vista trasera Porsche 911 GT3 RS. Medida envergadura alerón.....	34
Figura 24. Comparativa Batalla Vs Cuerda de los diferentes modelos.	36
Figura 25. Comparativa Vía Vs Cuerda de los diferentes modelos	37
Figura 26. Comparativa Tara Vs Cuerda de los diferentes modelos.	38

Figura 27. Comparativa Batalla Vs Envergadura de los diferentes modelos.	39
Figura 28. Comparativa Vía Vs Envergadura de los diferentes modelos.	40
Figura 29. Comparativa Tara Vs Envergadura de los diferentes modelos	41
Figura 30. Alerón montado sobre BMW M6.	44
Figura 31. Perfil alar dibujado en SolidWorks.	45
Figura 32. Diseño primer modelo.	47
Figura 33. Diseño alerón con costillas. Detalle estructura interior.	48
Figura 35. Soporte mejorado	49
Figura 34. Vista frontal soporte mejorado.	49
Figura 36. Tercer diseño.	50
Figura 37. Cuarto modelo.	50
Figura 38. Diseño alerón completo.	51
Figura 39. Alerón montado sobre Audi TTS.	52
Figura 40. Carga aerodinámica.	61
Figura 41. Resistencia aerodinámica alerón.	63
Figura 42. Resistencia aerodinámica soportes anchos.	64
Figura 43. Resistencia aerodinámica soportes estrechos.	64
Figura 44. Restricción cinemática.	65
Figura 45. Cuatro modelos estudiados.	67
Figura 46. Malla 3D del primer modelo.	68
Figura 47. Desplazamientos modelo 1.	69
Figura 48. Tensión del modelo 1 según Von Mises. Vista delantera.	70
Figura 49. Tensión máxima del modelo 1 según Von Mises. Vista trasera.	70
Figura 50. Masa modelo 1.	71
Figura 51. Diseño alerón con costillas simplificado para simular.	72
Figura 52. Fallo en el mallado de una de las costillas.	73
Figura 53. Arreglo de mallado de la costilla.	73
Figura 54. Mallado 3D costilla. Vista sección.	73
Figura 55. Desplazamientos modelo 2.	74
Figura 56. Tensión del modelo 2 según Von Mises. Vista delantera.	75
Figura 57. Tensión del modelo 2 según Von Mises. Vista trasera.	75
Figura 58. Masa modelo 2.	76
Figura 59. Desplazamientos del modelo 3.	78
Figura 60. Tensión según Von Mises del modelo 3. Vista trasera.	78

Figura 61. Vista en sección de la tensión máxima según Von Mises.....	79
Figura 62. Masa del modelo 3.	79
Figura 63. Desplazamientos modelo 4.	80
Figura 64. Tensión máxima según Von Mises del modelo 4.	81
Figura 65. Masa modelo 4.	81
Figura 66. Cargas impuestas por el reglamento.	82
Figura 67. Deformación modelo 4. Condiciones reglamento.....	83
Figura 68. Desplazamiento modelo para comparar en aluminio.	84
Figura 69. Tensiones máximas según Von Mises. Vista trasera.	85
Figura 70. Masa modelo aluminio.....	86
Figura 71. Desplazamientos modelo fabricado en carbono.....	88
Figura 72. Tensión máxima según Von Mises.	88
Figura 73. Masa modelo fibra de carbono.....	89
Figura 74. Plano conjunto alerón.....	103
Figura 75. Plano alerón.....	104
Figura 76. Plano soporte.....	105
Figura 77. Plano costilla.	106

Índice de tablas.

Tabla 1. Comparativa circuitos Blancpain GT Series.	13
Tabla 2. Equipos que participan en las Blancpain GT Series y sus respectivos modelos.	14
Tabla 3. Comparativa coeficiente de sustentación de los diferentes perfiles en función del ángulo de ataque.	29
Tabla 4. Comparativa coeficiente de resistencia al avance de los diferentes perfiles en función del ángulo de ataque.	29
Tabla 5. Comparativa de las características más importantes de los diferentes modelos de vehículos.	31
Tabla 6. Características Audi TTS.	35
Tabla 7. Propiedades AL-6061-T6.	58
Tabla 8. Resumen carga aerodinámica.	60
Tabla 9. Resumen resistencia aerodinámica.	63
Tabla 10. Resumen resultados del modelo 1.	71
Tabla 11. Resumen resultados del modelo 2	76
Tabla 12. Resumen resultados modelo 3.	79
Tabla 13. Resumen resultados modelo 4	81
Tabla 14. Propiedades fibra de carbono AS4.	87
Tabla 15. Costes generados por licencias y equipo	91
Tabla 16. Horas dedicadas al proyecto desglosadas por semanas.	92
Tabla 17. Coste mano de obra	93
Tabla 18. Costes totales.	93

Capítulo 1. Introducción.

1.1 Motivación.

En el mundo del motor existen numerosas competiciones de automóviles más allá de la famosa Fórmula1; una de las más conocidas tras la anteriormente nombrada es el campeonato de resistencia. Dentro de ésta, en la categoría GT, se compite con vehículos de calle los cuales han sufrido modificaciones para su adaptación a la competición. De todos los campeonatos y competiciones existentes en esta categoría, este trabajo se va a particularizar para una futura participación en las Blancpain Series GT. Este formato de competición acerca las carreras al aficionado al desarrollarse con automóviles que se podrían ver circular por las calles de cualquier ciudad. Además, el uso de este tipo de vehículos no reduce el atractivo de las competiciones ya que al ser modelos deportivos de alta gama las velocidades alcanzadas son altas y sus diseños impresionantes.

Son numerosos los cambios que precisa un vehículo que se quiere ajustar para la competición.



Figura 1. BMW M6

En la *Figura 1* se presenta un vehículo deportivo convencional, en concreto un BMW M6. Comparando este modelo con el presentado a continuación en la *Figura 2*, se pueden observar las diferencias entre uno y otro, siendo el segundo la versión adaptada para la competición.



Figura 2. BMW M6 GT3

Las variaciones que se producen modifican la posición del asiento del conductor, el volante o el tipo de frenos entre otros. Además se instala una jaula de seguridad en el interior del vehículo y distintos elementos aerodinámicos que mejoran la aerodinámica del monoplaza, incluyendo un alerón delantero, otro trasero y faldones laterales, como se puede apreciar en la *Figura 2*. La instalación de estos elementos más allá del diseño tiene su fundamento ingenieril en la carga aerodinámica que generan.

Actualmente la aerodinámica es uno de los parámetros más importantes en el diseño de cualquier vehículo, pero mucho más en uno de competición. Sin embargo esto no ha sido así siempre ya que durante las primeras competiciones que se realizaron a principios del siglo XX, los parámetros de importancia se centraban únicamente en el motor, en su potencia y cilindrada. Por ello se construían los vehículos con los motores más grandes y potentes posibles. La aerodinámica quedaba relegada a un segundo plano, respondiendo únicamente a consideraciones estéticas. Con el paso de los años, los motores fueron evolucionando y las altas velocidades que se alcanzaban en las competiciones provocaban que fueran muy peligrosas para los pilotos, debido a la facilidad con la que se perdía el control del monoplaza. Es por ello, que a partir de los años 60 empezaron a interesarse en la aerodinámica de los vehículos aprovechando las ventajas de estos elementos, los cuales permiten aumentar la velocidad en los pasos por curva y reducir la distancia de frenado. Sin embargo su importancia no solo radica en conseguir reducir el tiempo por vuelta ya que otro de los beneficios del estudio aerodinámico es la disminución de los accidentes en carrera así como del consumo de carburante.

Cualquier elemento aerodinámico de los anteriormente nombrados, tanto el alerón delantero, el trasero o los faldones laterales, pueden ser objeto de estudio desde dos líneas de trabajo, la primera de ellas realizando un estudio aerodinámico del mismo y la segunda, analizando dicho elemento desde una vertiente estructural. Esta segunda opción ha sido la elegida para el desarrollo del presente trabajo el cual se centrará en el estudio preliminar del alerón trasero.

1.2 Objetivos.

El objetivo principal de este trabajo fin de grado es la adaptación parcial de un vehículo comercial, el cual se puede adquirir en cualquier concesionario, para convertirlo en un monoplace de carreras cumpliendo con el reglamento de la competición, en concreto la Blancpain Series GT. Para ello se ha realizado el diseño y cálculo preliminar del alerón trasero de un vehículo de competición.

A continuación se presentan de forma más detallada los objetivos específicos que se han seguido para la elaboración del presente trabajo:

- Familiarización con los parámetros de diseño de un alerón así como con las distintas características de los vehículos. Estimación de las dimensiones del alerón a partir de los parámetros de los automóviles. Conocer las diferencias entre los vehículos GT y los convencionales y de esta manera aumentar los conocimientos sobre los primeros.
- Estimación de las cargas que actúan sobre el alerón y los soportes, así como las variaciones que pueden sufrir dependiendo de los diferentes parámetros de diseño.
- Familiarizarse con las herramientas de diseño y simulación numérica, en concreto SolidWorks e HyperWorks.
- Obtención de un modelo que cumpla con el reglamento y con el menor peso posible.

1.3 Estructura del documento.

Este trabajo ha sido estructurado en ocho capítulos que se describen a continuación.

En el capítulo de introducción se justifica el motivo de la elección del alerón como objeto de diseño y de estudio.

A continuación en el capítulo dos se realiza una breve introducción sobre el mundo del automovilismo y concretamente las competiciones GT (gran turismo). Se explican los distintos modelos que existen, las distintas competiciones y el reglamento referido a los alerones.

Posteriormente en el capítulo tres se determinan las dimensiones del alerón que se va a diseñar y estudiar. Estos datos se han obtenido mediante un procedimiento comparativo de diferentes modelos de vehículos y sus respectivas características.

Tras conocer las medidas que va a tener los diseños preliminares, se procede a realizarlos. Éstos son presentados en el capítulo cuatro. En éste se puede apreciar las diferencias entre los distintos modelos diseñados.

Una vez realizados los diseños se introduce el método numérico que se va a seguir para el estudio estructural. Se determina el software, el procedimiento de uso del programa y características más específicas como el material utilizado o las cargas aplicadas. Todo esto se puede encontrar en el capítulo cinco.

En el sexto capítulo se presentan los resultados obtenidos de los distintos modelos. Se elige el mejor de los distintos modelos presentados y se comprueba que cumpla el reglamento. También se realiza una variación del material, introduciendo material compuesto.

Una parte importante de cualquier proyecto ingenieril es el presupuesto de éste. En este caso al ser un diseño preliminar no se detallará el coste de la elaboración del producto ya que éste no es definitivo. Sin embargo estará incluido en este capítulo, el séptimo, todo el coste que ha conllevado el diseño y simulación del conjunto.

Por último en el octavo capítulo se presentan las conclusiones y las futuras líneas de trabajo sobre las que se puede seguir investigando tomando este trabajo como punto de partida. Al consistir en un diseño preliminar, son enumeran únicamente algunas de ellas.

Capítulo 2. Antecedentes.

2.1 Vehículo GT.

La mayoría de las fábricas de vehículos de alta gama, tienen entre sus modelos uno de ellos al cual clasifican con las siglas GT. Estas siglas hacen referencia al término “Gran Turismo”.

En este trabajo, al hacer referencia a un vehículo GT se pretende describir un automóvil deportivo el cual ha sido adaptado para la competición. Éste es un modelo homologado, con el cual podríamos circular por la vía pública y que se puede adquirir en un concesionario, al que se le han aplicado una serie de variaciones para competir con él.

2.2 Diferencias entre vehículo GT y uno comercial.

Las diferencias entre un vehículo de competición GT y uno homologado para la circulación por las vías públicas son sustanciales. [1]

Las características de un vehículo para el uso diario deben tener en cuenta el confort y debe poseer elementos que hagan más fácil y cómoda la conducción como pueden ser los controles de conducción y demás sistemas de ayuda que se incorporan en los vehículos actuales. Sin embargo, un vehículo de competición elimina cualquier componente adicional, que no sea imprescindible, con el objetivo de reducir el peso.

El motor que utilizan ambos modelos es básicamente el mismo, aunque el del modelo de competición aporta un par motor ligeramente superior. Los frenos utilizados por ambos modelos presentan importantes diferencias, esto es debido al desgaste que sufren en pista es completamente diferente que el que sufren fuera de circuito. Los discos utilizados son flotantes y más grandes, con este cambio se mejora el rendimiento y se optimiza la refrigeración de los mismos.

El habitáculo interior del automóvil también sufre importantes cambios, ya que el vehículo de competición elimina todos los componentes que carecen de uso, como son los asientos, excepto el del conductor, u otros elementos estéticos y de ayuda como puede ser los reproductores multimedia o GPS para reducir el peso total del vehículo. Además se modifica la posición del asiento del conductor situándolo en una posición más central. Esta modificación ayuda a mejorar el centro de gravedad llevándolo a una posición más central. Este asiento está fabricado en fibra de carbono y a medida para el piloto. El cinturón de seguridad que se monta es uno de cinco puntos, característico en los vehículos de competición. Dependiendo de la carrera, el automóvil puede contar o no con sistema de aire acondicionado de la misma manera que con un sistema de hidratación para el piloto. Asimismo, el volante está desarrollado de manera inteligente a fin de integrar control de tracción y estabilidad

En el vehículo de competición se instala también una jaula de seguridad, la cual está formada por un arco metálico que rodea al conductor con el objetivo de proteger al piloto en caso de accidente principalmente cuando se produce un vuelco. Además aporta rigidez al chasis. La carrocería de un vehículo convencional está fabricada en aluminio principalmente mientras que en los modelos GT está compuesta por un monocasco de aluminio y otros componentes de fibra de carbono, lo cual favorece la reducción del peso total del vehículo.

Desde el punto de vista aerodinámico aparecen importantes diferencias ya que en los modelos de competición se requiere mucho más efecto suelo. Para ello se monta un splitter con dos alerones en la parte delantera del vehículo y un gran alerón trasero en la parte trasera. Estos alerones generan la carga aerodinámica necesaria para circular a tan altas velocidades con garantías.

De todas estas modificaciones que sufre un vehículo de competición GT en este trabajo se va a estudiar la implementación del alerón trasero. Para ello se va a desarrollar un diseño preliminar del mismo.

Este análisis se va a realizar desde el estudio estructural del alerón y no desde la vertiente aerodinámica, aunque será necesaria una breve introducción para conocer los principios aeronáuticos más básicos y entender el funcionamiento del alerón, así como los principales elementos que lo constituyen.

2.3 Introducción sobre competición GT. WEC.

Son numerosas las categorías existentes en el mundo del motor. La FIA (Federation internationale de l'automobile) es el organismo oficial encargado de regular las distintas categorías que existen. Existen cuatro grandes campeonatos del mundo, en los que participan los distintos vehículos en distintas sub-categorías. [2] Estas son las siguientes:

- FIA Fórmula 1.
- Campeonato del mundo FIA DE RALLY.
- Campeonato del Mundo FIA de Resistencia.
- Campeonato del Mundo FIA de Rallycross.

El campeonato del Mundo FIA de Resistencia (WEC) es probablemente uno de los campeonatos del mundo FIA más espectaculares que existen actualmente, debido a los monoplazas que participan en ella. Los fabricantes de automóviles más importantes y exitosos del mundo como Ferrari, Lamborghini, Porsche, Audi, Bmw, etc. participan en estas competiciones.

Este campeonato del mundo tiene su origen en Marzo de 2012, sin embargo para situar el inicio de estas competiciones hay que retroceder hasta los primeros años del siglo XX. El comienzo de este tipo de carreras de larga distancia se produjo debido al afán por parte de los fabricantes de automóviles por comprobar la durabilidad de sus productos y para ello decidieron realizar carreras entre las ciudades más importantes de Europa. La primera de ellas recorrió la distancia entre París y Burdeos. Otras carreras importantes fueron las desarrolladas entre Paris-Viena, París-Berlín o incluso París-Beijing entre otras.

En estas primeras carreras ya competían famosas compañías como Renault, Peugeot y Fiat. Este tipo de carreras no estaban reguladas y no contaban con medidas de seguridad por lo que eran muy peligrosas. La última que se realizó en estas pésimas condiciones transcurrió entre Paris-Madrid en 1903 donde murieron doce corredores, entre ellos Marcel Renault uno de los hermanos Renault.

Unos años más tarde, en 1906, el Automobile Club de France celebró el primer gran premio en carreteras públicas cerradas alrededor de la ciudad de Le Mans. Se empezaron a construir los primeros circuitos Brooklands, Indianápolis y Monza para el desarrollo de las carreras. Mercedes-Benz, Ferrari, Alfa Romeo y Bentley construyeron sus marcas al poner a prueba su tecnología automotriz y competir con sus compañeros.

En 1923 se inaugura lo que hoy en día es una de las carreras más importantes del Campeonato del mundo de Resistencia, las 24 horas de Le Mans. Con esta competición se daría el empujón definitivo para el desarrollo de este tipo de carreras que se han ido celebrando hasta la actualidad.

2.4 Categorías WEC.

El campeonato del mundo de resistencia se encuentra dividido en distintas categorías dependiendo de las características del vehículo. [3]Éstas son las siguientes:

- LMP, “Le Mans Prototipe ”: está formado por tres subcategorías bastante diferenciadas:
 - LMP1-H, “Le Mans Prototipe Hibrido”: la característica fundamental de esta categoría es que el sistema de transmisión debe ser híbrido. No existen limitaciones de potencia o de tipología de transmisión. Son los vehículos más rápidos de la competición.
 - LMP1: categoría restringida a vehículos privados. El sistema de transmisión ha de ser íntegramente mediante un motor de combustión convencional.



Figura 3. Modelo LMP

- LMP2 “Le Mans Prototipe 2”: prototipo muy parecido al anterior, sin embargo esta categoría está pensada para ofrecer a equipos privados y novatos la oportunidad de iniciarse en el Campeonato del Mundo de Resistencia.
- GTE “Gran Turismo Endurance”: vehículos matriculables de Gran Turismo modificados para competir. Con este tipo de categoría se busca la conexión entre los vehículos de calle y los de competición. Aparecen también dos subcategorías:



Figura 4. Modelo GTE

- GTE PRO: estos equipos cuentan con corredores profesionales. Para poder competir en esta categoría habrá que cumplir una serie de requisitos que justifique la calidad de los pilotos.
- GTE AM: categoría pensada para pilotos amateur. En esta categoría se correrá con los vehículos utilizados por la categoría GTPRO los años anteriores.

2.5 Blancpain Series GT

Además del Campeonato del Mundo de Resistencia (WEC) existen otras competiciones privadas en las cuales se desarrollan carreras en las distintas categorías explicadas en el apartado anterior.

Como ya se ha comentado previamente, el propósito de este trabajo es el estudio del diseño conceptual de un alerón para su posible implantación en un vehículo deportivo para poder competir en un futuro carreras de larga distancia en categoría GT. La idea de competición va a consistir en la participación en las Blancpain GT series.

Las Blancpain Series se han convertido en la referencia mundial de las competiciones GT. Su nombre se debe a su principal patrocinador, el fabricante de relojes suizos Blancpain. Desde 2014 esta competición consiste en la fusión de las Blancpain GT Series Sprint Cup y las Blancpain GT Series Endurance Cup, es decir, actualmente se combinan carreras de corta duración (unas tres horas) con otras de resistencia. Por este motivo el campeonato está dividido en cinco sprint y otras cinco de larga distancia. Esta competición está formada por los equipos más prestigiosos del mundo del motor y cuentan con los mejores pilotos. Sin embargo, es una competición idónea para conductores no profesionales y jóvenes talentos gracias a su reglamento donde se limita el número de pilotos PRO en cada competición.

Las Blancpain GT Series se rigen por la misma regulación que el Campeonato del Mundo FIA, por lo que deberá cumplir el mismo reglamento. Estas condiciones serán esenciales para el diseño, por lo que serán desarrolladas a continuación.

2.6 Reglamento Blancpain

Las Blancpain Series GT siguen el reglamento definido por la FIA para estas categorías.
[4]

Este apartado será de vital importancia para el diseño del alerón ya que marcará algunas de las condiciones de diseño y posteriormente también definirá parámetros que debe cumplir el alerón desde el punto de vista estructural.

2.6.1 Reglamento referido a los parámetros de diseño.

La normativa de la FIA permite agregar un dispositivo aerodinámico superior a la carrocería pero éste debe ser en reemplazo de los dispositivos del automóvil original.

Este dispositivo debe estar compuesto de un perfil alar, un soporte de ángulo homologado, dos placas laterales montadas en los extremos laterales del perfil de ala, dos soportes verticales entre la carrocería y el perfil del ala. A continuación se expone detalladamente el reglamento específico para cada elemento que constituye el conjunto del alerón.

- Material: está permitido la fabricación de las distintas partes del alerón con material compuesto, excepto para los soportes verticales que deben estar en material metálico.
- Perfil de alar: la cuerda máxima del perfil debe ser 300mm. Este dato será muy importante para el diseño.
- Placas laterales: deben tener un grosor mínimo de 10mm. En caso de tener los bordes redondeados, éstos deben tener un radio constante de 5 mm.
- El conjunto "perfil de ala, soporte en ángulo, placas laterales" debe poder caber dentro de una caja de 1800x450x150 mm.
- Soportes verticales: deben estar unidos a la estructura principal, es decir, al chasis. La distancia entre soportes y placas laterales debe ser de 100 mm como mínimo.
- El punto más alto del dispositivo no debe ser más alto que el punto más alto del techo.

Para el correcto diseño del alerón se deben cumplir todos estos requisitos.

2.6.2 Reglamento referido a las condiciones estructurales.

Al aplicar una carga vertical de 2400N sobre la superficie del plano principal, el punto más retrasado del borde posterior del plano principal no puede desviarse más de 10 mm verticalmente (tomando como referencia una parte estructural del chasis). Esta carga se aplicará de manera uniforme y simultánea sobre distintos puntos en la dirección longitudinal del alerón. Todas ellas se colocarán en la posición que representa el 50% de la longitud de la cuerda y en las cotas de valor 164 mm, 452 y 740 mm a ambos lados del eje transversal del alerón. [5]

2.7 Circuitos.

Las Blancpain GT Series se desarrollan en los circuitos más prestigiosos de toda Europa.

A continuación se aprecia en la *Tabla 1* , la comparativa sobre los distintos circuitos en los que se desarrollan las competiciones. En ella aparecen distintos parámetros informativos de cada circuito. También están representados en la tabla otros datos como son la longitud por vuelta del circuito y la velocidad máxima que se puede alcanzar en cada uno de ellos.

Este último dato será muy importante para el análisis estructural como se mostrará a continuación ya que la carga aerodinámica irá directamente relacionada con la velocidad alcanzada por el vehículo.

Tabla 1. Comparativa circuitos Blancpain GT Series. [6]

Circuito	Longitud circuito (Km)	Máxima velocidad (Km/h)
Paul Ricard (Francia)	5,842	340
Monza (Italia)	5,793	345
Silverstone (Gran Bretaña)	5,891	301
Misano (Italia)	4,226	293
Spa-Francorchamps (Bélgica)	7,004	312
Zandvoort (Holanda)	4,307	326
Nurburgring (Alemania)	7,004	340
Hungaroring (Hungría)	4,381	295
Barcelona (España)	4,655	340

Como se aprecia en la tabla, el circuito donde se alcanza la mayor velocidad punta va a ser en Monza, llegando hasta los 345 km/h. Esta velocidad será la crítica de estudio que habrá que tener en cuenta ya que originará la situación más desfavorable.

Más adelante se explicará que se hace con este dato y si finalmente es un parámetro limitante o no.

2.8 Vehículos que participan.

Actualmente las más prestigiosas fábricas de automóviles participan en esta competición ya que es un gran escaparate para poder mostrar al público sus últimos diseños en vehículos deportivos. No hay que olvidarse de que los vehículos con los que se compiten son los mismos, con alguna modificación, que los que se pueden adquirir en los respectivos concesionarios, por lo que mediante estas carreras se puede atraer a nuevos clientes.

En la siguiente tabla se exponen los equipos que participan y los respectivos modelos con los que compiten.

Tabla 2. Equipos que participan en las Blancpain GT Series y sus respectivos modelos.
[7]

Equipo	Modelo de vehículo
Aston Martin	Aston Martin Vantage AMR GT3
Audi Sport	Audi R8 LMS
Bentley	Bentley Continental GT3
BMW	BMW M6 GT3
Ferrari	Ferrari 488GT3
Honda	Acura Honda NSX GT3
Lamborghini	Lamborghini Huracán GT3
Lexus	Lexus RC F GT3
Mercedes-AMG	Mercedes-AMG GT3
Porsche	Porsche 911 GT3 RS

2.9 Alerón

El alerón es un elemento importante en la aerodinámica del automóvil cuya misión principal es ejercer una fuerza de anti-sustentación (hacia abajo) que impida que el vehículo se despegue del suelo cuando alcanza altas velocidades.

El objetivo principal del alerón es generar carga aerodinámica pero también genera fuerzas de resistencias al avance que frena al vehículo. Es por ello que será importante que el alerón genere la mayor carga aerodinámica posible sin penalizar demasiado el avance del automóvil.

Para solventar en parte este problema, en la actualidad se han ideado sistemas mecánicos accionados por el piloto, que actúan sobre las alas del alerón y cambian su inclinación frente al aire. Estas modificaciones consiguen reducir su resistencia en rectas para obtener mayor velocidad (inclinando menos el alerón), y en las curvas se aumenta el grado de inclinación para aportar carga aerodinámica al vehículo. Sin embargo, este sistema, debido a su complejidad no será tenido en cuenta para el diseño preliminar del alerón.

2.9.1 Perfil alar

En la *Figura 5* se pueden apreciar las distintas partes que componen un perfil alar. Todas ellas serán parámetros a tener en cuenta para el diseño del alerón.

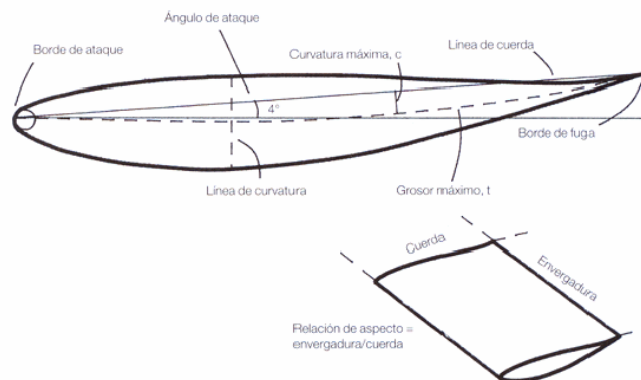


Figura 5. Elementos de un perfil alar.

A continuación se introducen algunos conceptos relacionados con el perfil alar y que se pueden observar en la imagen anterior [8].

Superficie alar: superficie total de las alas.

Perfil alar: perfil resultante al realizar un corte transversal al ala. Las proporciones de sus componentes logran los efectos aerodinámicos necesarios para generar la sustentación necesaria. Éstos son los siguientes:

Borde de ataque: parte delantera del ala donde la curvatura es máxima.

Borde de salida: parte trasera del ala donde se unen las superficies interior y exterior del perfil.

Extradós: superficie exterior del ala.

Intradós: superficie interior del ala.

Cuerda: línea que une el borde de ataque con el de salida.

Envergadura: distancia de punta a punta del ala.

Ángulo de ataque: ángulo formado entre la cuerda y la dirección de la corriente de aire.

2.9.2 Historia alerones

A principios del siglo XX se comenzaron a construir los primeros vehículos, en aquel entonces los parámetros de importancia se centraban únicamente en el motor, en su potencia y cilindrada.

La aerodinámica solo era tenida en cuenta desde un punto de vista estético. Durante los primeros años, esto no fue un problema ya que los vehículos no alcanzaban altas velocidades asique no había riesgo de que se perdiera el contacto entre los neumáticos y el asfalto. Durante los siguientes años se fueron mejorando las características de los vehículos, siendo cada vez más protagonistas en la sociedad.

Este interés fue tal que en los años 50 se realizó la primera competición de automóviles, la World Car Sport Car Championship. En esta competición ya se empezó a tener en cuenta la aerodinámica ya que los vehículos que compitieron tenían una geometría pequeña y afilada, para reducir así la resistencia al avance que genera el aire.

En el año 1956 se instaló por primera vez un alerón en un vehículo (ver *Figura 6*). La idea fue del ingeniero y piloto suizo Michael G. May el cual lo colocó encima de la cabina de su Porsche 550 Spider. [9]



Figura 6. Primer alerón montado en un vehículo por Michael May en su Porsche 550 Spider.

Este alerón le permitía alcanzar mayores velocidades sin el riesgo de que el vehículo se levantara del suelo, gracias a la carga aerodinámica que se creaba. Esta idea no fue bien aceptada ya que los organizadores de las carreras alegaban que impedía la visibilidad al resto de pilotos por lo que no se permitió competir con este tipo de alerón prohibiendo su uso en todas las competiciones.

Durante la siguiente década se mantuvo en el olvido la idea del alerón de May, sin embargo en 1966 Jim Hall, ingeniero y piloto estadounidense, volvió a montar un alerón en su vehículo. [10]. Esta reaparición se produjo en el Cam-Am, campeonato sin restricciones, el cual era utilizado por los ingenieros de la época para presentar y probar sus últimos modelos e innovaciones. Jim montó en su Chaparral 2E un gran alerón situado en una posición más retrasada comparada con la montada por May. (Ver *Figura 7*)

Los resultados obtenidos fueron inmejorables, consiguiendo la victoria del campeonato y posteriormente victorias en importantes competiciones como las 24 Horas de Le Mans logrando mejores tiempos que sus competidores pilotando un automóvil con peor motor que el resto.



Figura 7. Jim Hall pilotando su Chaparra 2E

Desde entonces se introdujo el alerón en la mayoría de carreras automovilísticas.

Como se ha visto en la *Figura 6* y *Figura 7* la posición de los alerones se encontraba muy alta respecto al suelo, esto fue así hasta que se descubrió el efecto suelo, lo que provocó que se cambiara este diseño situando estos elementos lo más cerca posible del suelo ya que de esta forma se crea más carga aerodinámica.

Actualmente es la FIA quien regula la utilización de los alerones, limitando las dimensiones de éstos, el número de elementos por los que están formados o los materiales de las distintas partes como se ha explicado en el apartado 2.6.

2.10 Aerodinámica.

A pesar de que el estudio de este trabajo se va a realizar desde una vertiente estructural, es importante conocer algunos principios básicos aeronáuticos para poder entender el funcionamiento del alerón y las fuerzas que actúan sobre él. Para ello se va a realizar una pequeña introducción aerodinámica sobre los principios básicos aerodinámicos.

Sobre un elemento aerodinámico, como es el alerón, actúan cuatro fuerzas aerodinámicas. Estas fuerzas van a permitir a dicho elemento el movimiento en dirección vertical (arriba o abajo) y a distinta velocidad (más rápido o más despacio). La magnitud de cada fuerza va a ser la que limite el movimiento de la estructura a través del aire.

2.10.1 Fuerzas aerodinámicas.

Para la explicación de las fuerzas que actúan sobre el alerón se va a tomar de ejemplo las fuerzas que actúan sobre un avión ya que son las que permiten que éste vuele. Posteriormente se comentará las similitudes y diferencias que presentan estas fuerzas comparadas con las que actúan sobre de un vehículo. [11]

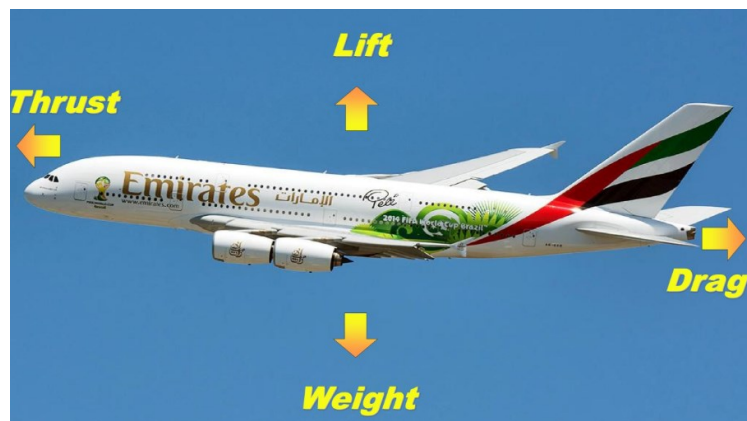


Figura 8. Fuerzas aerodinámicas sobre un avión.

Peso (Weight): es la fuerza generada por la gravedad y que empuja al objeto hacia el suelo. En el caso del alerón del coche el peso es una fuerza favorable. Sin embargo su valor no puede ser muy elevado ya que cuanto mayor sea, mayor debe ser el empuje que habría que realizar para mover el vehículo.

Fuerza de empuje: es la que crea el movimiento del elemento hacia delante, para ello debe ser mayor que la fuerza de resistencia. En el caso de un automóvil, esta fuerza vendrá dada por el motor del vehículo.

Fuerza sustentación (Lift): fuerza generada sobre un cuerpo que se desplaza a través de un fluido de forma perpendicular a la velocidad del desplazamiento. Es la fuerza que hace que un elemento se levante (ver *Figura 8*). En el caso del alerón de un vehículo se denomina carga aerodinámica. Nos interesa que esta fuerza sea hacia abajo (negativa) porque el objetivo del alerón de un automóvil es justo el contrario al ala de un avión, se quiere evitar que el vehículo se despegue del suelo.

Fuerza resistencia al avance (Drag): cuando un objeto está rodeado por un fluido, esta fuerza es la que dificulta su movimiento. Este es el motivo por el cual es más difícil andar dentro de una piscina que fuera, ya que el agua tiene más “drag” que el aire.

Estas dos últimas fuerzas son las que se van a tener en cuenta para el diseño y posterior estudio, por lo que a continuación se explican con más detalle al igual que sus respectivos coeficientes.

2.10.1.a Carga aerodinámica y coeficiente de anti-sustentación.

La carga aerodinámica va a ser la encargada de crear el apoyo aerodinámico suficiente para que se mantenga el contacto entre neumático y asfalto además de conseguir un mejor agarre entre ambos.

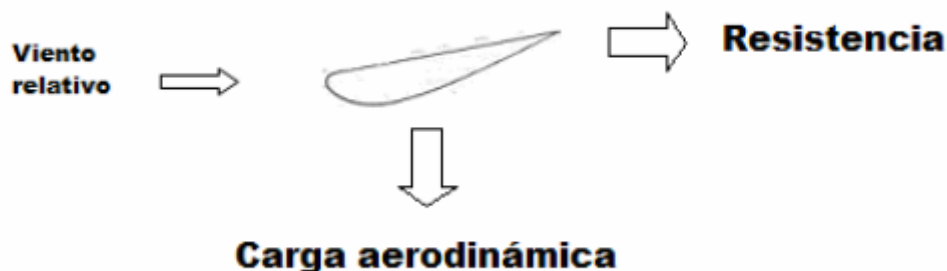


Figura 9. Fuerzas aerodinámicas alerón automóvil.

Esta fuerza viene definida por la siguiente fórmula.

$$F_z = \frac{1}{2} c_z \rho A v^2 \quad (1)$$

En la ecuación, F_z hace referencia a la fuerza de sustentación. A es el área del ala que está en contacto con el fluido, que en este caso será la envergadura por la cuerda. V hace referencia a la velocidad del fluido y ρ a la densidad de éste. C_z es el coeficiente de sustentación e indica la capacidad que posee un cuerpo al ser rodeado por un fluido de crear una fuerza perpendicular a la dirección de avance de este.

En el caso de los alerones de un vehículo, la función de la fuerza es "empujar" el vehículo hacia el suelo. El coeficiente de sustentación tendrá un valor negativo, aunque se trabajará con él en valor absoluto sabiendo que la fuerza generada irá hacia abajo.

Como se puede observar en la siguiente imagen, el valor de este coeficiente va directamente relacionado con el ángulo de ataque que tenga nuestro perfil alar.

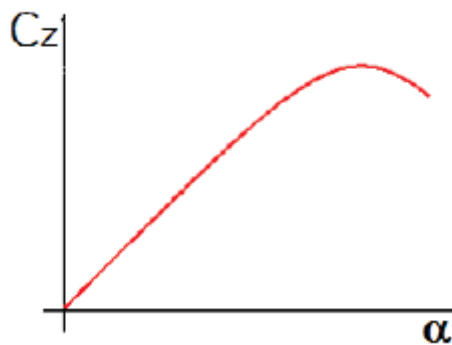


Figura 10. Coeficiente sustentación - ángulo ataque.










2.10.1.b Fuerza de resistencia al avance. Coeficientes de resistencia aerodinámica.

Fuerza generada sobre un cuerpo que se desplaza a través de un fluido en dirección paralela a la velocidad de avance pero de sentido contrario. Esta fuerza va asociada a la forma del objeto y a la cantidad de energía que disipa cuando atraviesa un flujo. En nuestro caso nos interesa que este valor sea el mínimo posible. Está definida por la siguiente expresión:

$$F_D = \frac{1}{2} C_D \rho A v^2 \quad (2)$$

Donde F_D hace referencia a la fuerza, C_D al coeficiente de resistencia al avance, ρ a la densidad, A al área frontal del alerón, es decir el alto por la envergadura y v la velocidad del fluido.

El coeficiente de resistencia aerodinámica indica la resistencia que opone un cuerpo a avanzar a través de un fluido. Va a depender de la forma del objeto y del ángulo de ataque del alerón. Estas relaciones las observamos en las siguientes imágenes.

Forma		Coeficiente de resistencia
Esfera	→ 	0.47
Media esfera	→ 	0.42
Cono	→ 	0.50
Cubo	→ 	1.05
Cubo en ángulo	→ 	0.80
Cilindro largo	→ 	0.82
Cilindro corto	→ 	1.15
Cuerpo aerodinámico	→ 	0.04
Medio cuerpo aerodinámico	→ 	0.09

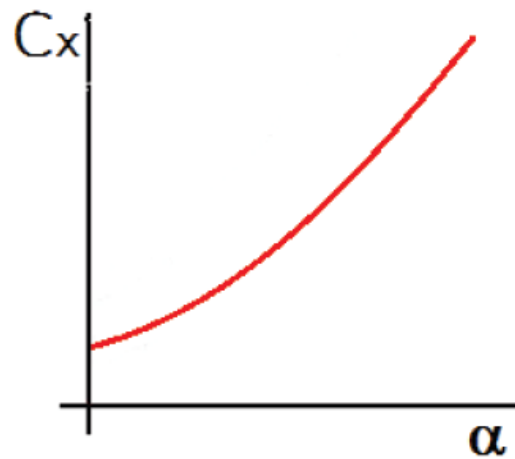


Figura 11. Coeficiente de resistencia-ángulo de ataque.

Figura 12. Coeficiente de resistencia al avance en función de la geometría.

Ambos coeficientes, tanto el de sustentación como el de resistencia al avance, tienen medidas relativas y valores adimensionales sobre cuánta sustentación y resistencia puede tener un cuerpo. Los dos dependen del ángulo de ataque, por ello habrá que tenerlos en cuenta al elegir el ángulo de ataque del diseño.

Gracias a esta pequeña introducción ya se han conocido cuales son las fuerzas que actúan sobre el alerón, cómo se pueden calcular y cuáles son los parámetros de las que dependen, siendo la carga aerodinámica la más importante.

La aparición de esta fuerza se explica mediante tres principios físicos, los cuales se van a desarrollar a continuación.

2.10.2 Principios físicos.

2.10.2.a Principio de Bernoulli.

Daniel Bernoulli fue un físico austriaco del siglo XVIII que encontró la relación directa entre la presión y la velocidad de un fluido. La siguiente ecuación reducida hace referencia a dicha relación.

“En todo fluido ideal (sin viscosidad ni rozamiento), incomprensible, en régimen laminar de circulación por un conducto cerrado, la energía que posee el fluido permanece constante a lo largo de todo su recorrido” [12]

Este teorema se resume en la siguiente ecuación simplificada.

$$p + \frac{1}{2}\rho v^2 = cte \quad (4)$$

En dónde p es la presión estática. La letra griega rho, ρ es la densidad del fluido, en nuestro caso aire. La letra v es la velocidad del flujo y el conjunto de $+\frac{1}{2}\rho v^2$ es la presión dinámica.

Analizando la ecuación se llega a la conclusión de que si la velocidad del fluido aumenta la presión disminuye y viceversa.

2.10.2.b Principio continuidad

Este principio describe el comportamiento de un fluido dentro de un conducto.

Cuando un fluido fluye por un conducto de diámetro variable, su velocidad cambia debido a que la sección transversal varía de una sección del conducto a otra.

“En todo fluido incompresible, con flujo estacionario (en régimen laminar), la velocidad de un punto cualquiera de un conducto es inversamente proporcional a la superficie en ese punto.” [13]

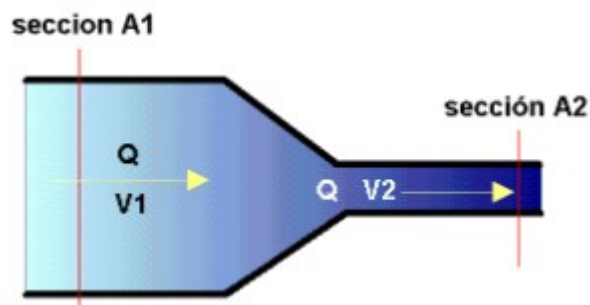


Figura 13. Ecuación de continuidad.

La siguiente ecuación ya simplificada, describe lo que se aprecia en la *Figura 10*.

$$A_1 * V_1 = A_2 * V_2 = \text{cte} \quad (5)$$

Donde A_1 y A_2 son las superficies de ambos conductos y V_1 y V_2 las velocidades del fluido en cada tramo.

2.10.2.c Efecto Venturi

Este principio es una combinación de los dos anteriores ya que relaciona la presión, el área de contacto y la velocidad del fluido.

“Un fluido en movimiento dentro de un conducto cerrado disminuye su presión al aumentar la velocidad después de pasar por una zona de sección menor.” [14]

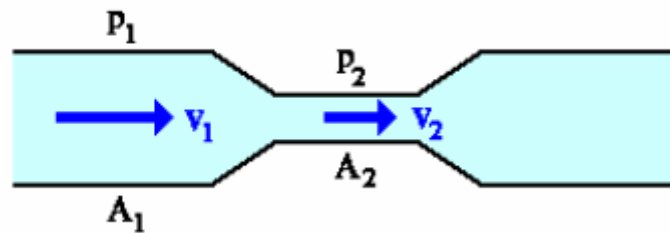


Figura 14. Efecto Venturi.

Una vez mencionados estos tres principios ya podemos entender cómo se genera la carga aerodinámica que actúa sobre el alerón.

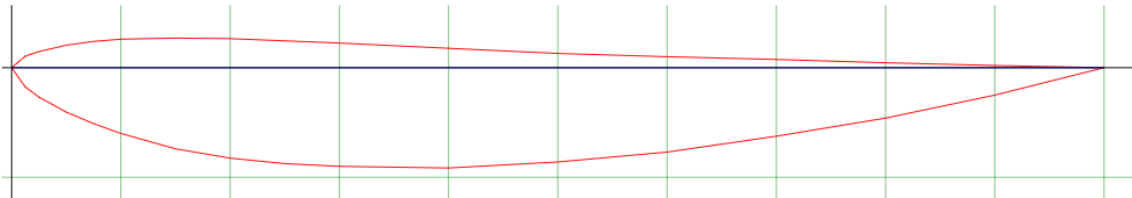


Figura 15. Ejemplo perfil alar alerón.

El alerón es un ala no simétrica, por lo que las partículas de aire que circulan por la parte superior del ala, como se aprecia en la *Figura 15*, tendrán que hacer un recorrido más corto que las que circulen por la parte inferior. Por lo tanto, las que circulan por el intradós lo harán con menor velocidad que las que lo hacen por el extradós.

Teniendo presentes los principios explicados anteriormente, esta diferencia de velocidad entre el intradós y el extradós del alerón va a generar una variación de presiones entre ambas partes del perfil alar, siendo mayor la presión en la parte superior del ala, generando así una fuerza de sustentación negativa (hacia abajo) o como también es conocida, generando la carga aerodinámica.

Capítulo 3. Parámetros de diseño del alerón

3.1 Elección del vehículo.

Una vez se ha puesto en contexto el estudio del alerón, el siguiente paso ha consistido en la decisión del vehículo con el cual se pretendería participar en ellas en el futuro.

Se ha seleccionado un modelo de vehículo de un equipo que actualmente participa en la competición explicada, las Blancpain Series GT, pero corriendo con un modelo diferente al que se está compitiendo actualmente para así poder ofrecer nuevas variedades e introducir un modelo distinto en esta competición. El modelo elegido fue el Audi TTS.

3.1.1 Características del vehículo.

El Audi TTS es la variante más deportiva de la famosa gama Audi TT. Cuenta con un motor de 225 kW de potencia y 306Cv. Sus pequeñas dimensiones, característico de este modelo comparado con otros deportivos, le permite alcanzar elevadas velocidades sin la necesidad de montar un motor con tanta potencia si se compara con sus competidores. Estas dimensiones las podemos apreciar en las siguientes imágenes, donde las cotas están dadas en mm.

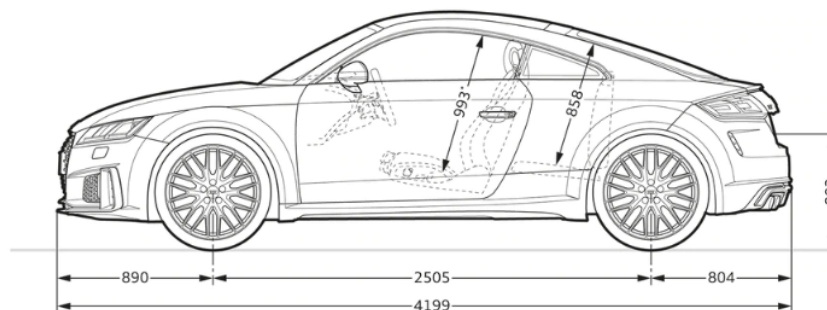


Figura 16. Vista lateral con medidas Audi TTS. [15]

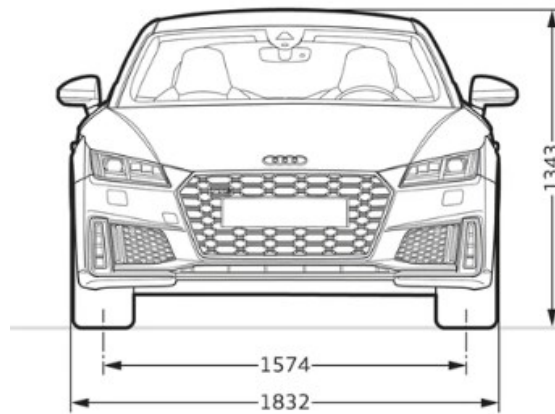


Figura 17. Vista frontal con medidas Audi TTS. [15]

Las dimensiones del vehículo serán tenidas en cuenta para calcular la dimensión del alerón.

3.2 Selección del perfil aerodinámico.

Al ser un trabajo enfocado desde la parte estructural del estudio del alerón, para el diseño se ha tomado como punto de inicio otros estudios ya realizados sobre la aerodinámica de estas estructuras. Para ello se cogió como referencia y como punto de partida un Trabajo fin de Grado en el cual se analizaron diferentes perfiles aerodinámicos y se compararon mediante el cálculo de los coeficientes de sustentación (C_z) y de resistencia al avance (C_d). [16] Las condiciones de desarrollo del trabajo de referencia fueron muy parecidas a las que se pretende basar este estudio, por lo que fue un buen punto de partida para el comienzo del desarrollo del alerón.

Este estudio comparativo se realizó entre tres perfiles alares, estos son: Ch 10, Davis sm y e385. Como ya se ha explicado anteriormente, para la elección del perfil habrá que tener en cuenta los valores de los coeficientes de sustentación y de resistencia aerodinámica, ya que a mayor ángulo de ataque se creará mayor carga aerodinámica pero también mayor resistencia al avance por lo que dependerá de los circuitos en los que queramos competir.

Tabla 3. Comparativa coeficiente de sustentación de los diferentes perfiles en función del ángulo de ataque. [12]

Ángulo de ataque	Ch10	Davis sm	e385
6°	1,77	1,11	1,34
10°	2	1,4	1,62
12°	2,11	1,48	1,72
14°	2,15	1,51	1,75
16°	2,22	1,50	1,71
18°	2,15	1,48	1,65
20°	2,09	1,42	1,60

Tabla 4. Comparativa coeficiente de resistencia al avance de los diferentes perfiles en función del ángulo de ataque. [12]

Ángulo de ataque	Ch10	Davis sm	e385
6°	0,08	0,04	0,05
10°	0,12	0,095	0,11
12°	0,16	0,13	0,15
14°	0,19	0,17	0,20
16°	0,22	0,22	0,24
18°	0,26	0,279	0,30
20°	0,31	0,34	0,37

Como se ha presentado anteriormente, los circuitos de la Blancpain Series son circuitos muy rápidos y con pocas curvas cerradas, asique un bajo ángulo de ataque va a generar la suficiente fuerza de sustentación y baja resistencia aerodinámica.

Analizando los datos de las tablas anteriores, el perfil alar objeto de estudio será un Ch10 con un ángulo de ataque de 10°.

Para el diseño del perfil aerodinámico se ha utilizado el software llamado AirfoilTools. Introduciendo el perfil y el valor de la cuerda, el programa realiza el contorno del perfil. Es importante seleccionar la opción de “reverse” para obtener el perfil alar de un alerón y no del ala de un avión.

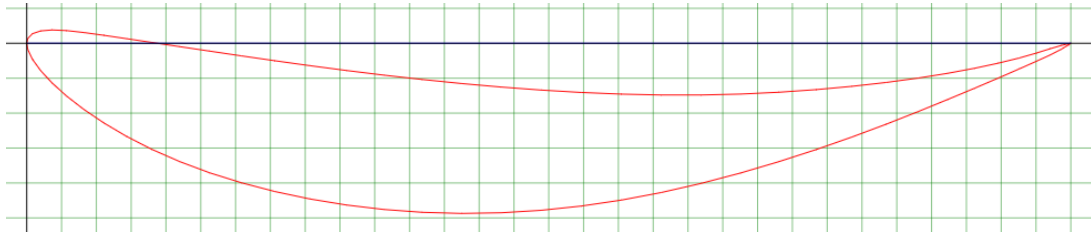


Figura 18. Perfil alar Ch 10. 300mm de cuerda.

3.3 Selección parámetros geométricos.

3.3.1 Introducción.

Para el resto de parámetros necesarios para definir el alerón (cuerda y envergadura) se ha tomado como referencia los distintos modelos que actualmente compiten en esta competición y en otros que han competido en años anteriores.

Realizando un estudio comparativo de las dimensiones de 7 de ellos se han obtenido las dimensiones finales.

Esta comparativa se aprecia en la *Tabla 5* en ella aparecen las dimensiones más importantes del alerón, además de otros parámetros importantes sobre el vehículo que posteriormente se utilizarán para sacar relaciones entre diferentes datos y definir los parámetros de diseño de mi alerón. Para entender la tabla, se van a introducir unos conceptos mecánicos.

Batalla: distancia entre el eje delantero y trasero de un vehículo.

Vía: distancia entre las dos ruedas del mismo eje. Esta distancia es tomada desde el plano central de la rueda.

Tara: masa del vehículo, con su equipo fijo autorizado, sin personal, pasajeros ni carga pero con su dotación de agua, combustible, lubricante, repuestos, herramientas y accesorios necesarios.

Tabla 5. Comparativa de las características más importantes de los diferentes modelos de vehículos.

Modelo	Batalla (mm)	Vía (mm)	Tara (Kg)	Cuerda alerón (mm)	Envergadura alerón (mm)	velocidad máxima
Porsche 911 GT3 RS	2453	1880	1430	338	1771	312 Km/h
Porsche 911 GT2 RS	2453	1880	1470	310	1763	340 Km/h
Acura Honda NSX GT3	2630	2040	1240	375	1880	308Km/h
Aston Martin Vantage GT3	2740	1979	1250	340	1780	314 Km/h
Audi R8 LMS GT3	2700	1997	1225	355	1780	359Km/h
BMW M6 GT3	2901	2046	1300	375	1900	348Km/h
FERRARI 488 GT3	2700	2015	1260	350	1865	330Km/h
LAMBORGHINI HURACAN GT3	2660	2050	1230	365	1930	330Km/h
LAMBORGHINI GALLARDO G3 REITER	2560	1930	1238	360	1850	300Km/h

Para conseguir los datos de la *Tabla 5* se han analizado imágenes de los distintos modelos y mediante relaciones lineales entre los distintos parámetros de los modelos, se ha completado la tabla.

A continuación se explica el procedimiento seguido para este cálculo. Para ello se presenta como ejemplo, el cálculo realizado con el Porsche 911 GT3 RS.

Para obtener las medidas de las diferentes imágenes se ha utilizado un software llamado “Screen Ruler”

A continuación se presentan las dimensiones del vehículo. Éstas han sido obtenidas del catálogo oficial de Porsche. [17]



Figura 19. Vista lateral Porsche 911 GT3 RS. Medidas reales batalla y longitud del vehículo. [17]

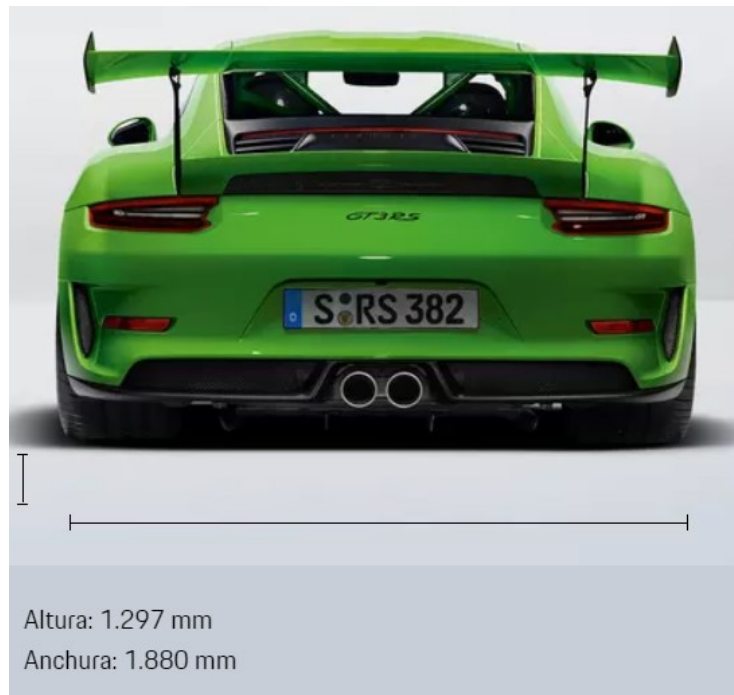


Figura 20. Vista trasera Porsche 911 GT3 RS. Medidas reales anchura y altura del vehículo. [17]

Para el cálculo de la cuerda se ha seguido el siguiente procedimiento:

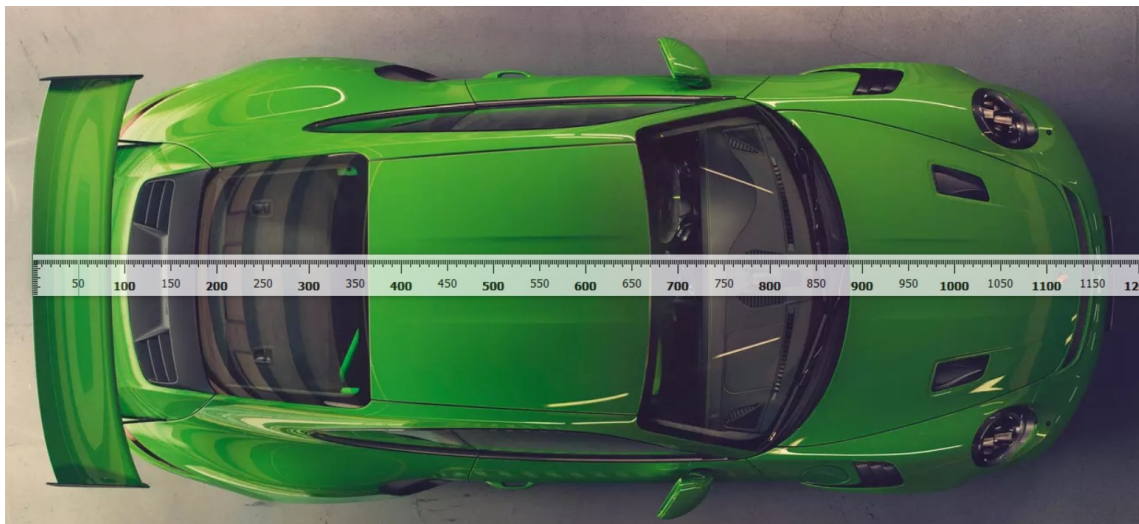
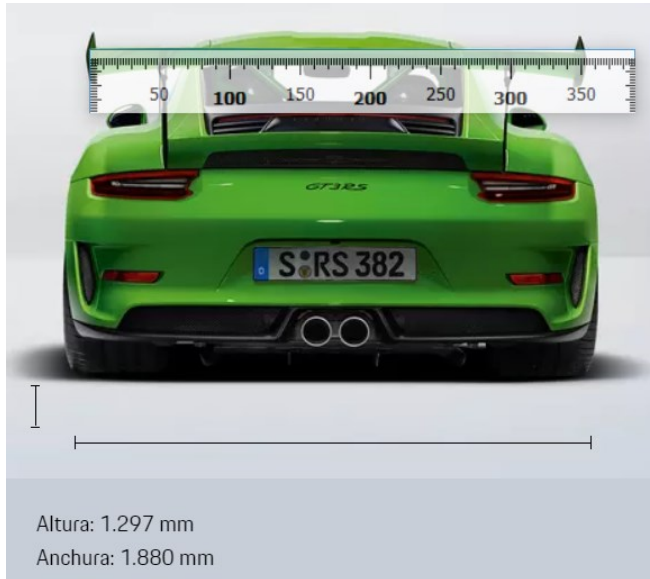


Figura 21. Vista planta Porsche 911 GT3 RS. Medida cuerda alerón y longitud total del vehículo. [17]

En la *Figura 1* se aprecia que la cuerda del alerón es 88 mm y el largo total 1170mm. La longitud real del vehículo es 4557mm. Mediante el uso de una regla de tres se obtiene un valor aproximado de la cuerda para este modelo.

$$\text{Cuerda} = \frac{87 \cdot 4557}{1172} = 338,3 \text{ mm}$$



*Figura 23. Vista trasera Porsche 911 GT3 RS.
Medida envergadura alerón.*



*Figura 22. Vista trasera Porsche 911 GT3 RS.
Medida anchura vehículo.*

A continuación se presenta el desarrollo del cálculo de la envergadura del modelo utilizado para el ejemplo.

La envergadura el alerón tomada en la *Figura 23* ha sido de 350mm. La anchura total del vehículo medida en la *Figura 22* es de 370mm y la anchura real 1880mm. Es por ello que la envergadura total estimada del alerón es de:

$$\text{Envergadura} = \frac{350 \cdot 1880}{370} = 1778,4 \text{ mm}$$

Este mismo procedimiento se ha realizado con cada modelo que se encuentra en la tabla.

Este método de cálculo de las dimensiones necesarias para el diseño del alerón no es la más fiable pero si un buen procedimiento para empezar con el diseño del ala.

Como se aprecia a continuación la medida de la cuerda del Porsche GT3 RS es superior al límite impuesto por la FIA por lo que habrá que modificar dicho valor posteriormente.

Una vez se ha rellenado la tabla, hay que analizar estos datos y sacar relaciones entre ellos para poder extrapolarlos al modelo de coche elegido para el estudio, el Audi TTS.

Tabla 6. Características Audi TTS. [15]

Modelo	Batalla (mm)	Vía (mm)	Tara (Kg)	Cuerda alerón (mm)	Envergadura alerón (mm)	Velocidad máxima (Km/h)
Audi TTS (225KW/306CV)	2505	1832	1345			280

Los datos que se encuentran en la tabla se han obtenido de la ficha técnica del modelo. Para el cálculo de la cuerda y el alerón he realizado comparaciones entre las características más representativas de cada vehículo, las que aparecen en las tablas.

Mediante el método de regresión lineal se han obtenido los siguientes datos.

3.3.2 Cálculo de la cuerda Audi TTS

En este apartado se presentan las relaciones entre los distintos parámetros de estudio a partir de las cuales se ha obtenido la dimensión de la cuerda del modelo de estudio.

- Batalla Vs Cuerda

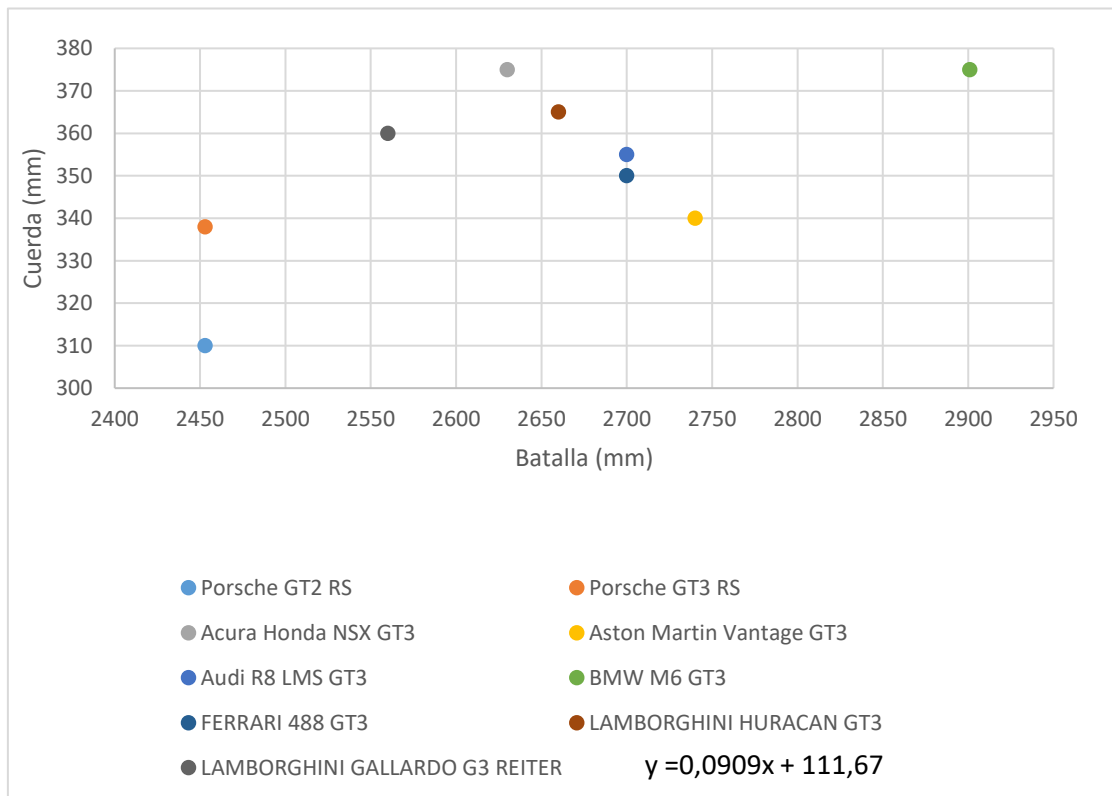


Figura 24. Comparativa Batalla Vs Cuerda de los diferentes modelos.

En la presente figura se compara la batalla (eje x) respecto la cuerda (eje y). Aplicando un sistema de regresión lineal se obtiene la ecuación mostrada en el gráfico.

Sustituyendo el valor de la batalla en la ecuación se obtiene:

Para $x=2505\text{mm}$

Cuerda: $Y=0,0909 \cdot 2505 + 111,67 = 339,37\text{mm}$

- Vía Vs Cuerda

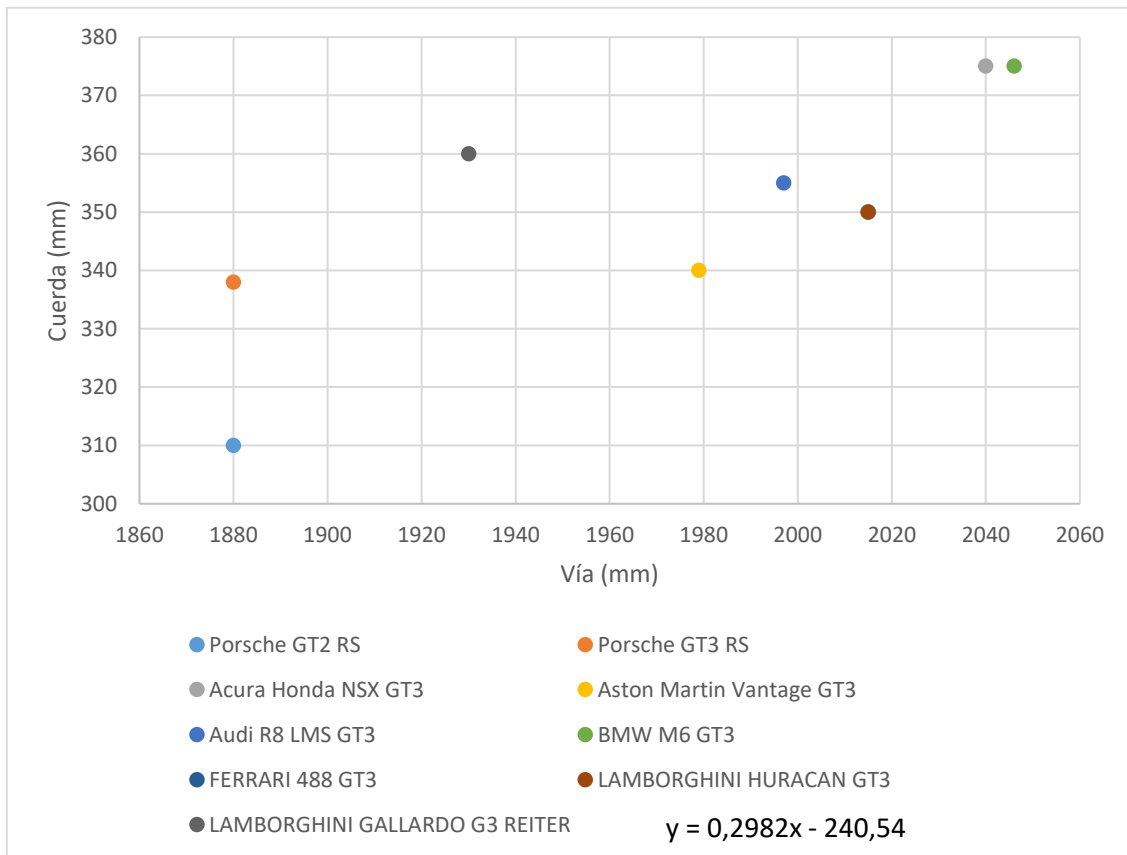


Figura 25. Comparativa Vía Vs Cuerda de los diferentes modelos

Se compara la vía (eje x) respecto la cuerda (eje y). Aplicando un sistema de regresión lineal se obtiene la ecuación mostrada en el gráfico.

Sustituyendo el valor de la batalla en la ecuación se obtiene:

Para $x = 1832\text{mm}$

Cuerda: $y = 0,2982 \cdot 1832 - 240,54 = 305,76\text{mm}$

- Tara Vs Cuerda

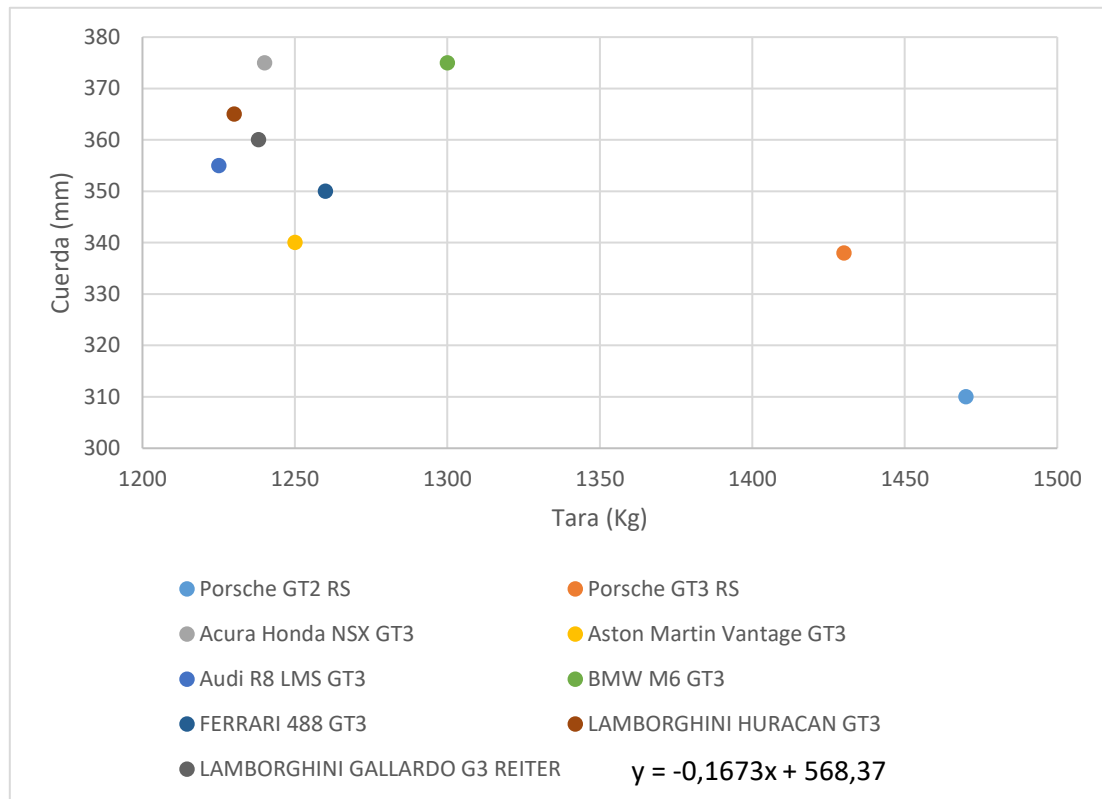


Figura 26.Comparativa Tara Vs Cuerda de los diferentes modelos.

En esta figura se compara la vía (eje x) respecto la cuerda (eje y). Aplicando un sistema de regresión lineal obtenemos la ecuación mostrada en el gráfico.

Sustituyendo el valor de la batalla en la ecuación se obtiene:

Para $x = 1345$ kg

Cuerda: $y = -0,1673 \cdot 1345 + 568,37 = 343,4\text{mm}$

- Análisis de los datos

Como se puede observar, los resultados obtenidos mediante los tres procedimientos son muy próximos, por lo que se realizó una media simple para tener un valor aproximado de la dimensión de la cuerda del alerón.

$$\text{Cuerda: } \frac{339.37+305.76+343.4}{3} = 329,5\text{mm}$$

3.3.3 Cálculo de la envergadura Audi TTS

A continuación se realizó el mismo procedimiento para el cálculo de la envergadura del alerón.

- Batalla Vs Envergadura

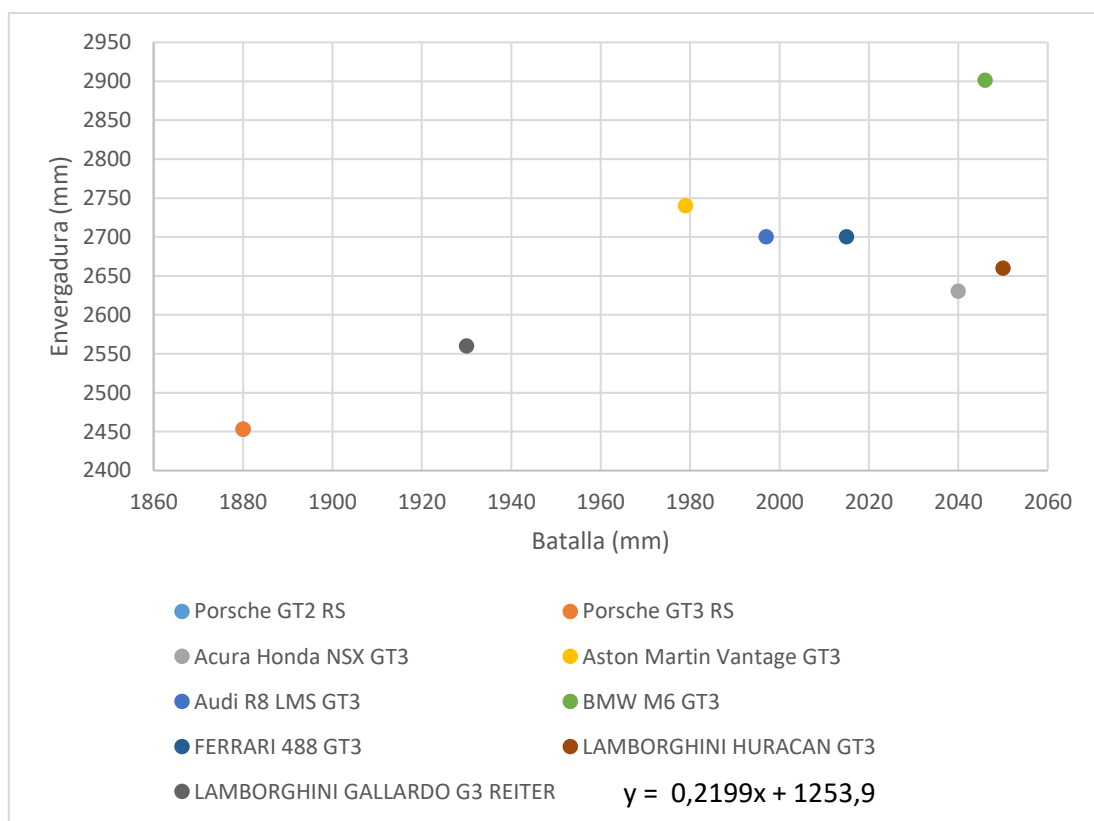


Figura 27. Comparativa Batalla Vs Envergadura de los diferentes modelos.

En la figura se compara la batalla (eje x) respecto la envergadura (eje y). Aplicando un sistema de regresión lineal se obtiene la ecuación mostrada en el gráfico.

Sustituyendo el valor de la cuerda calculada anteriormente en la ecuación se obtiene:

Para $x=2505\text{mm}$.

Envergadura: $y = 0,2199x + 1253,9 = 1804,75\text{mm}$.

- Vía Vs Envergadura

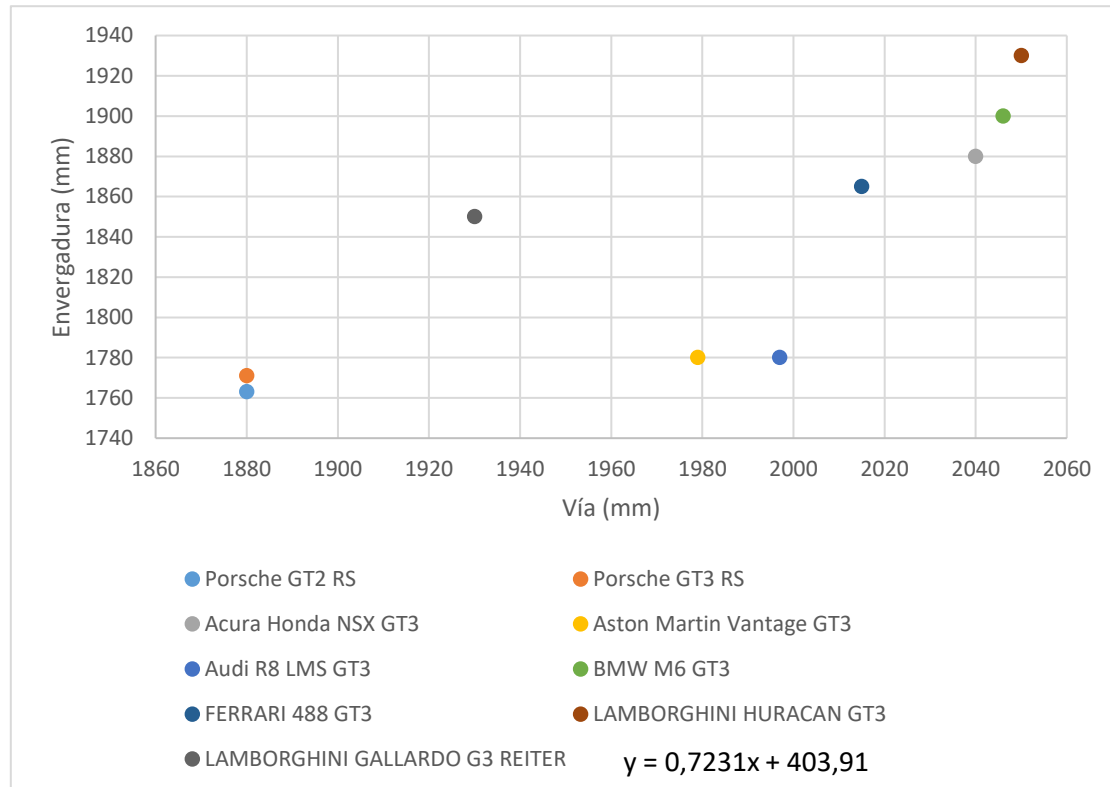


Figura 28.Comparativa Vía Vs Envergadura de los diferentes modelos.

Se compara la vía (eje x) respecto la envergadura (eje y). Aplicando un sistema de regresión lineal se obtiene la ecuación mostrada en el gráfico.

Sustituyendo el valor de la cuerda calculada anteriormente en la ecuación se obtiene:

Para $x=1832$

Envergadura: $y = 0,7231x + 403,91 = 1728,63\text{mm}$

- Tara Vs Envergadura

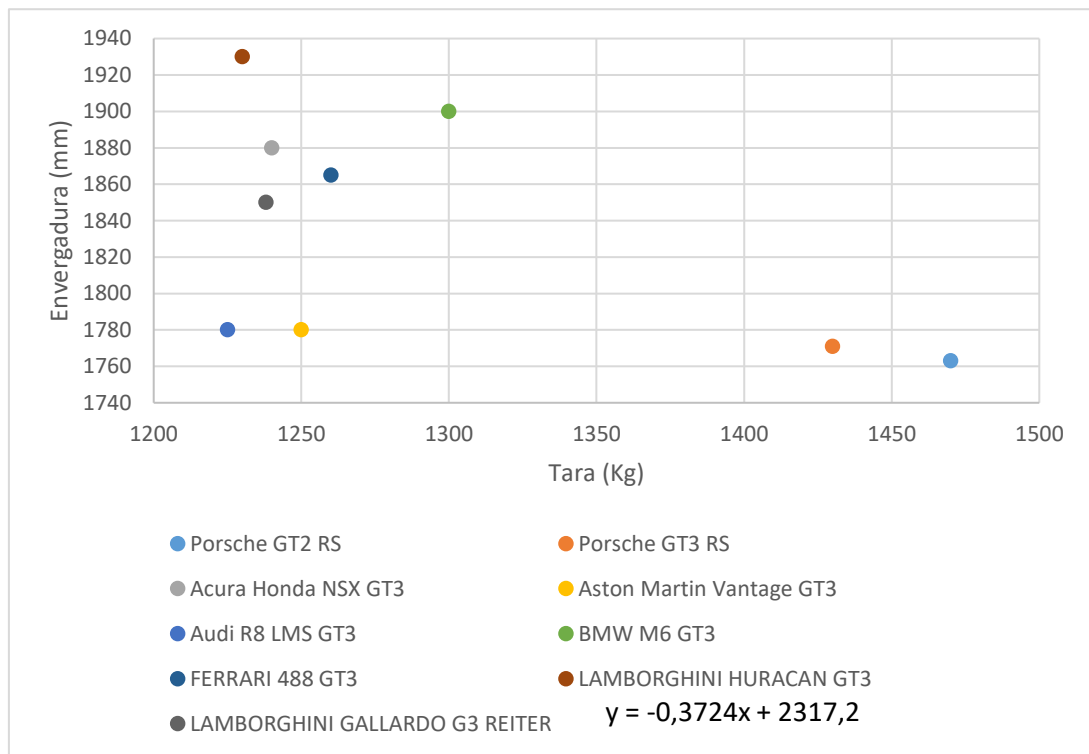


Figura 29. Comparativa Tara Vs Envergadura de los diferentes modelos

Aplicando un sistema de regresión lineal comparando la Tara (eje x) respecto la envergadura (eje y), se obtiene la ecuación mostrada en el gráfico.

Sustituyendo el valor de la cuerda calculada anteriormente en la ecuación se obtiene:

Para $x=1345\text{mm}$

Envergadura: $y = -0,3724x + 2317,2 = 1816,32\text{mm}$

- Análisis de los datos

Siguiendo el mismo razonamiento que con la cuerda, se realiza una media simple entre los tres valores obtenidos y se halla la envergadura del alerón.

$$\text{Envergadura: } \frac{1804,75+1728,63+1816,32}{3} = 1783mm$$

Antes de comenzar a diseñar con los valores que se acaban de calcular, hay que fijarse en la reglamentación que tiene este tipo de elementos estructurales, las cuales se han comentado anteriormente.

3.3.4 Dimensiones finales.

El valor obtenido de la cuerda mediante este procedimiento experimental no es válido ya que excede los 300mm que sitúa la FIA como normativa, como ya se ha visto en el apartado 2.6.1. Este resultado era de esperar ya que como se puede observar en la tabla todos los alerones tienen un valor de cuerda mayor que el permitido.

Estos resultados puede resultar un tanto extraños ya que ningún valor cumple la normativa. Por ello y ya que este procedimiento se ha realizado para escoger los parámetros de diseño del alerón, se tomará el valor más próximo y que cumpla el reglamento.

Sin embargo, la envergadura total del ala está dentro de los límites permitidos ya que $1780mm < 1800mm$.

Las medidas del alerón serán las siguientes:

- Cuerda: 300mm
- Envergadura: 1780mm

Capítulo 4. Diseño alerón.

4.1 SolidWorks.

El alerón ha sido diseñado mediante el programa de diseño CAD, SolidWorks. Este software permite el diseño de piezas en 2D y 3D, así como la creación de conjuntos en los que se pueden incorporar las piezas diseñadas anteriormente. También se pueden realizar los respectivos planos de las piezas y de los conjuntos.

Además de los procesos de diseño, SolidWorks permite seleccionar el material del que va a estar fabricada la pieza, pudiendo ser seleccionado de la librería que incorpora el programa por defecto o introducido por el usuario en caso de que el material en cuestión no estuviera incluido en la librería. Gracias a esta opción, SolidWorks muestra parámetros importantes como el peso, el área o el volumen de la pieza o conjunto de piezas que se quieren estudiar, de esta forma se elimina la necesidad de recurrir a otro software para conocer dichos resultados.

Dependiendo del tipo de pieza que se quiera diseñar, SolidWorks permite la elección de dos tipos de opciones básicas.

La primera de ella se encuentra con el nombre de “Saliente/base”. Esta opción se utiliza para el diseño de piezas con espesor. Para ello se utilizan principalmente las operaciones de extrusión, revolución y vaciados. Mediante la combinación de las distintas operaciones se consigue la pieza final. Para cualquier operación el primer paso es realizar un croquis 2D de la pieza, para ello previamente hay que seleccionar el plano donde se quiere realizar. Tras el diseño del croquis el siguiente paso es dotar al diseño de profundidad, para pasar de un diseño 2D a uno 3D.

La segunda opción permite crear superficies, es decir sólidos cuyas caras no tienen espesor. Esta opción es muy útil para realizar carcasas o diseños en los cuales el espesor se introduce posteriormente en función del material empleado o con otro software. Para esta opción existen las mismas operaciones que en la opción anterior con la única diferencia que la pieza creada no tiene espesor.

4.2 Aspectos generales de los diseños realizados.

Como se puede observar en la siguiente imagen, *Figura 30*, el alerón completo que se monta sobre un vehículo de competición GT está formado por tres piezas claramente diferenciadas, que posteriormente se ensamblan para general el conjunto final.



Figura 30. Alerón montado sobre BMW M6.

En la imagen se aprecia que el conjunto está formado por el alerón, los soportes y los end plates.

Por ello el diseño del conjunto se ha realizado siguiendo el método de construcción de un diseño real, diseñando las diferentes piezas por individual y posteriormente realizando el ensamblaje.

Para el diseño del alerón se ha utilizado una de las posibilidades que ofrece SolidWorks. Ésta consiste en importar de un software de diseño de aeronáutico, las coordenadas XYZ del perfil alar, las cuales son generadas automáticamente por el mismo software. De esta forma se ha podido dibujar el perfil y a partir de él, el resto del alerón.

A continuación se muestra el perfil del alerón generado al importar las coordenadas en SolidWorks.

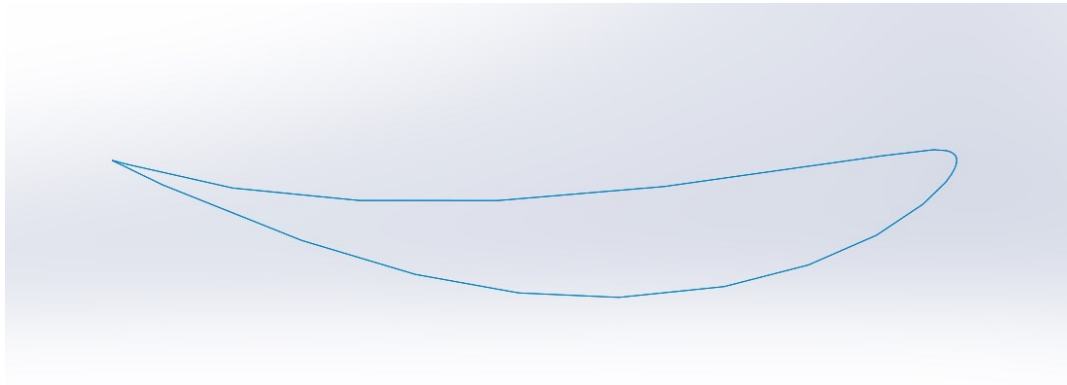


Figura 31. Perfil alar dibujado en SolidWorks.

Además de realizarse el diseño del alerón, también se han diseñado los soportes que unen el elemento de estudio con el chasis del vehículo, ya que éstos tienen gran importancia desde el punto de vista estructural.

Este elemento estructural ha tenido mucha importancia en el proceso de mejora del conjunto del alerón, ya que el peso del conjunto y la resistencia al avance están directamente relacionadas con el diseño de los soportes como se explica en el 2.10.1.b.

El último elemento que constituye el conjunto del alerón, se conoce como “end plates”. Son piezas que se colocan en los extremos del alerón para evitar que se genere flujo turbulento alrededor de éste. Los end plates no han sido diseñados para este trabajo de diseño preliminar por dos motivos. El primero de ellos es debido a su baja importancia en el estudio estructural, ya que al tener dimensiones pequeñas, la resistencia aerodinámica generada comparada con los otros elementos se ha considerado despreciable. Además, para el correcto diseño de estos elementos habría que realizar un estudio aerodinámico para obtener las dimensiones con el objetivo de que cumplieran con su función y con el menor peso posible. Este cálculo se aleja del objetivo de este trabajo. Por ambos motivos se ha tomado la decisión de no incluir este elemento en el diseño de los diferentes conjuntos, los cuales serán presentados más adelante.

Para este trabajo se han diseñado cuatro modelos distintos. El proceso de diseño de los distintos modelos ha sido simultáneo al proceso de simulación y análisis de resultados, el cual se encuentra explicado en el *Capítulo 6*.

Es por ello que para comprender las variaciones sufridas entre un modelo y el siguiente hay que tener en cuenta los resultados obtenidos en las simulaciones

Para todos los modelos diseñados, las dimensiones van a ser las calculadas anteriormente y presentadas en el punto 3.3.4

4.3 Primer modelo.

El primer modelo presentado consiste en un alerón macizo con dimensiones 300mmx1780mm.

Para el diseño de este primer elemento se ha utilizado la operación extruir. Tras importar la geometría del alerón, ésta se selecciona y se elige la operación. Posteriormente se introduce la profundidad de la extrusión, en este caso 1780mm. Para este primer diseño, el alerón es macizo por lo que el primer elemento ya se encuentra diseñado.

Posteriormente se han diseñado los soportes que conectan el alerón al vehículo. Tienen unas dimensiones de 50x280mm, su interior es macizo. Se encuentran separados 650mm y centrados respecto al eje transversal del alerón, cumpliendo por tanto la normativa explicada en 2.6.2.

Para conseguir esta idea de diseño se realiza un croquis rectangular y se extruye. La máxima dificultad que tiene este elemento es el diseño de la parte superior del soporte, la que se encuentra en contacto con el alerón, ya que para la correcta unión ambos elementos deben presentar la misma curvatura. Para ello, se copia el croquis importado del alerón y se copia en el diseño de los soportes, de esta manera se ha podido realizar un corte en la zona superior con la geometría del ala. A continuación se introduce la distancia entre los soportes y entre soporte y un extremo del alerón y el conjunto queda totalmente definido.

Con el objetivo de reducir el peso, se les ha realizado un vaciado interior.

En la siguiente imagen se muestra el primer diseño.

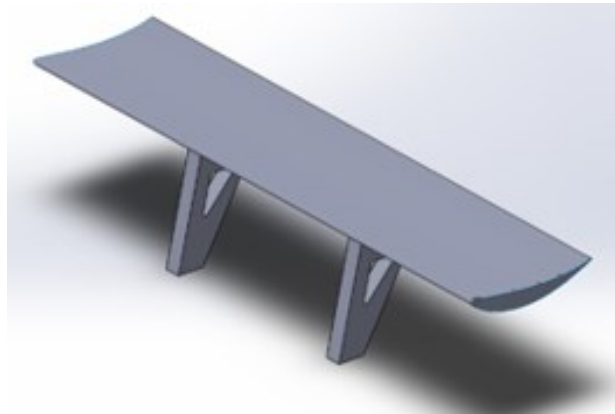


Figura 32. Diseño primer modelo.

4.4 Segundo modelo.

Para este segundo diseño se ha imitado la estructura de las alas de las aeronaves, las cuales son huecas y están formadas por costillas situadas longitudinalmente.

En este caso, el alerón está formado por cinco costillas, las cuales tiene la misma geometría que el alerón ya que están diseñadas con el mismo perfil alar. Cada costilla tiene un espesor de 10mm y están situadas de manera equidistante a lo largo de la envergadura del alerón, a 445mm.

Las propias costillas tendrán vaciados para reducir el peso total del conjunto y estarán unidas por largueros longitudinales, lo cual dotará a la estructura de mayor resistencia.

Como se acaba de comentar, en este modelo aparece otro nuevo elemento, las costillas. Éstas se han diseñado individualmente y posteriormente se ha procedido al ensamblaje del conjunto.

En este diseño, el alerón, a diferencia del caso anterior, está hueco. Para ello partiendo del modelo anterior se ha realizado un vaciado anterior. Para que el vaciado mantenga la misma geometría que el perfil y así poder introducir las costillas, SolidWorks permite equidistanciar entidades, de tal forma que crea un nuevo croquis con la misma geometría a una distancia definida por el usuario. De esta forma se ha realizado el vaciado. Los

soportes van a tener la misma geometría, separación y posición que en el modelo anterior, por lo que se ha seguido el mismo procedimiento que el explicado para el modelo anterior.

Para el ensamblaje de los distintos elementos únicamente hay que indicar que las costillas son tangentes al alerón. Como ambos elementos describen el mismo perfil, el software los coloca en la posición correcta. El último paso consiste en definir la distancia entre las costillas.

Tras realizar estas operaciones, el conjunto ha quedado definido y se puede observar a continuación.

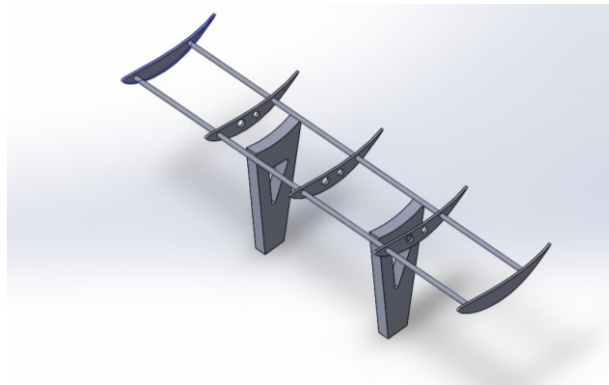


Figura 33. Diseño alerón con costillas. Detalle estructura interior.

4.5 Tercer modelo.

En este diseño se conserva la idea del ala de un avión y se introducen pequeñas modificaciones para mejorar distintos parámetros de estudio los cuales se calculan y explican en 6.4.

Es por ello que los procedimientos de diseño que se han seguido han sido idénticos a los explicados para el modelo anterior.

Se ha modificado la distancia entre los soportes, para hacerlos coincidir con la posición de las costillas, situándose con una distancia de separación entre ambos de 855mm.

La segunda modificación también se ha realizado sobre los soportes. Con el objetivo de reducir el peso, éstos han cambiado su geometría pasando de tener una forma rectangular a una de “doble T”. Para realizar este cambio, se ha realizado un vaciado de las zonas que se han querido eliminar. Para ello se realiza un croquis de las zonas que se quieren suprimir, se selecciona la operación y la profundidad de la operación.

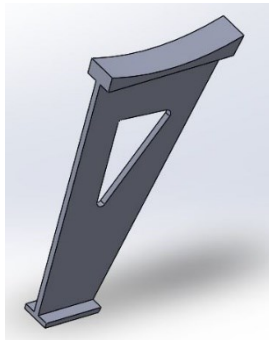


Figura 35. Soporte mejorado



Figura 34. Vista frontal soporte mejorado.

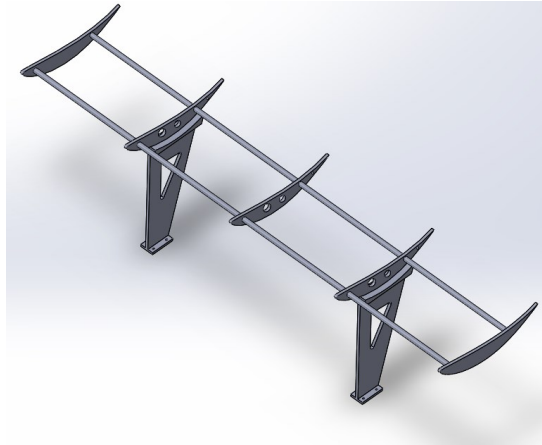


Figura 36. Tercer diseño.

4.6 Cuarto modelo.

Para este cuarto y último diseño se ha mantenido la idea del modelo anterior pero se suprimen las tres costillas interiores, quedándose solo las de los extremos.

Los soportes mantienen la misma geometría y posición que en el tercer modelo.

Dado que la geometría de los distintos elementos es la misma que en el modelo anterior, no se han introducido nuevas operaciones de diseño, únicamente se ha modificado el ensamblaje en el cual solo se han introducido dos costillas.

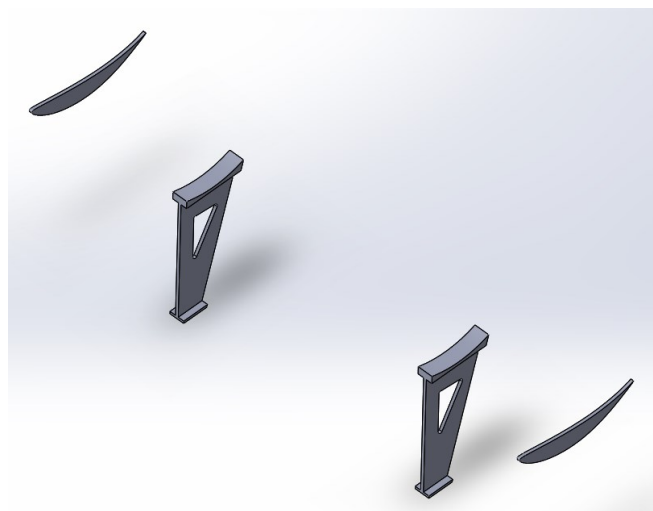


Figura 37. Cuarto modelo.

4.7 Diseño completo del alerón.

En todo diseño mecánico es importante no olvidar la finalidad de éste y donde va a ir instalado. Es por ello que se ha querido montar uno de los diseños sobre el vehículo elegido.'

La finalidad de este apartado es la visualización hipotética del conjunto total del alerón, por lo que a pesar de no haber diseñado anteriormente los end plates por los motivos que ya se han presentado, en este diseño sí que aparecerán para que el conjunto final sea lo más real posible. Lógicamente, las dimensiones de éstos son totalmente arbitrarias con el único fin de conseguir un aspecto realista del conjunto.

El vehículo sobre el que se ha montado el alerón se ha descargado de GrabCad. [18] Esta página web permite la descarga de distintos modelos CAD, los cuales han sido subidos por los usuarios. La mayoría de ellos son gratuitos aunque también se pueden encontrar algunos de pago.

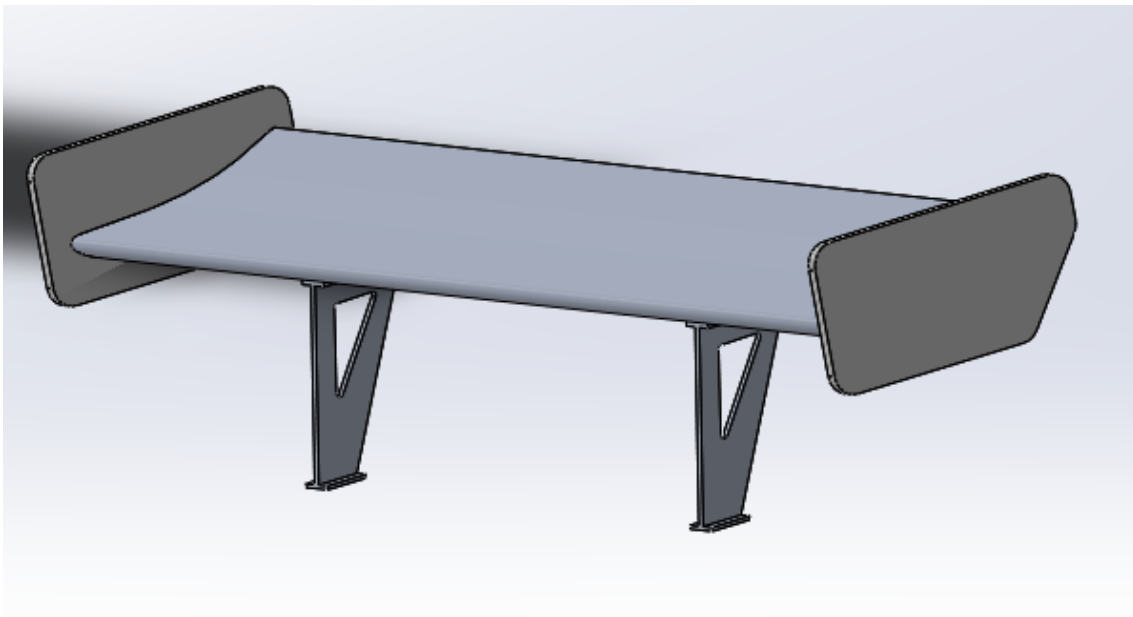


Figura 38. Diseño alerón completo.

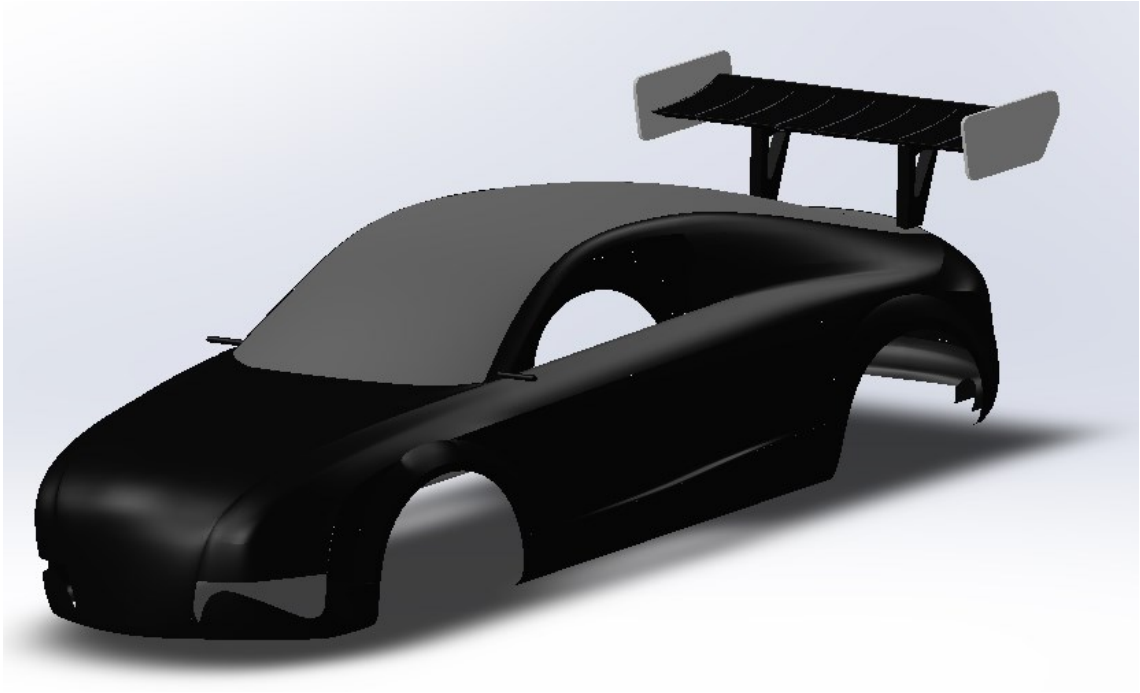


Figura 39. Alerón montado sobre Audi TTS.

Capítulo 5. Modelo numérico.

5.1 Método de elementos finitos. MEF.

5.1.1 Introducción

El método de elementos finitos MEF (o FEM en inglés) es un método de aproximación de problemas continuos para el análisis de cualquier fenómeno físico. [19]

La descripción de las leyes de la física relacionadas con el espacio y el tiempo están normalmente expresadas en función de ecuaciones diferenciales parciales. La resolución de éstas mediante métodos analíticos es muy compleja. Para ello se utilizan distintos métodos de discretización mediante los cuales se aproximan los resultados de las ecuaciones diferenciales en modelos de ecuaciones numéricas más sencillas que pueden ser resueltos mediante métodos numéricos.

El MEF divide un problema continuo en un número finito de partes, llamados elementos. Los puntos de unión entre cada uno de estos elementos son conocidos como “nodos”. El análisis del comportamiento del elemento queda reducido al estudio de las funciones de forma y de interpolación de cada nodo. Este estudio se desarrolla de forma individual de cada uno de los problemas discretos mediante funciones locales y posteriormente la solución final se obtendrá mediante el ensamblaje de las soluciones individuales, es decir a través de la suma de las funciones locales obteniendo una función global.

El resultado del comportamiento de todo el problema continuo será una aproximación de los valores obtenidos en cada nodo, por lo que cuánto más elementos tenga el problema, más exacta será la solución.

Todos estos nodos se relacionan conjuntamente mediante una malla, que va a ser la que defina el número de elementos en la que se divide el problema. Cada uno de los retículos que forma la malla va a ser considerado un elemento finito. La generación de la malla se realiza mediante programas denominados generadores de malla. Dependiendo de las relaciones de conectividad entre cada nodo de la malla (si tienen conexión directa o no) se define el número de incógnitas o también conocido como grados de libertad que van a tener las ecuaciones lineales que se van a analizar para la resolución del problema. El

conjunto de estas ecuaciones lineales van a formar la matriz de rigidez del problema $[K]$. El número de elementos de la matriz, es decir, el número de ecuaciones que definen el problema depende del número de nodos.

Conocida la matriz de rigidez, se utiliza el siguiente sistema de ecuaciones algebraicas que relación las distintas incógnitas del problema que se necesitan calcular:

$$[K] \cdot (u) = (f) \quad (6)$$

Donde (u) representa el vector desplazamiento de los nodos y (f) el vector de las sollicitaciones que soportan los nodos, es decir las cargas aplicadas sobre ellos.

Conocidos los desplazamientos es posible determinar los esfuerzos que soportan las barras.

Esta metodología de trabajo se puede aplicar tanto en problemas 2D como 3D facilitando la resolución en ambos casos.

Este método de resolución de problemas se va a desarrollar en distintas ramas de estudio, tanto en problemas de estructuras, de transmisión de calor, fluidos o de campos electromagnéticos dada la complejidad de resolución mediante métodos analíticos.

Este método de cálculo no pretende sustituir a los test físicos que se realizan a los distintos problemas de estudio sin embargo reduce considerablemente el tiempo y el dinero empleado para el diseño y cálculo de cualquier estudio.

Además, hasta el desarrollo de este tipo de softwares el cálculo de estos problemas era prácticamente impensable debido a la complejidad de las ecuaciones y gracias a los ordenadores se han podido resolver y con una probabilidad de fallo mucho menor.

5.1.2 Fases del cálculo MEF. Funcionamiento de un programa de elementos finitos.

Para poder obtener la solución del problema, el software utilizado divide esta resolución en tres etapas:

- **Pre-procesador:** es la primera fase de la solución. Se prepara el modelo de estudio para el cálculo. Primero se realiza el diseño del modelo o se importa de otro software de diseño CAD. Los softwares de cálculo MEF son compatibles con los de diseño CAD para facilitar las soluciones de los problemas. A continuación se definen los materiales que se van a emplear y sus respectivas propiedades. Posteriormente se realiza el mado de elemento a estudiar, mediante este paso dividimos el problema continuo de geometría compleja en elementos más simples, conocidos como elementos finitos. El siguiente paso consiste en definir las cargas exteriores que actúan en el problema. Éstas pueden ser puntuales, lineales o superficiales. Por último definimos las condiciones de contorno del problema, es decir, en este apartado indicaremos si elemento de estudio tiene alguna restricción en alguno de los ejes que impida su desplazamiento.
- **Calculador:** genera las soluciones del problema. En este apartado se calculan las ecuaciones explicadas anteriormente pero de forma automáticamente, generando las matrices de rigidez, resolviendo dichas ecuaciones y finalmente proporcionando un resultado. Los datos obtenidos en este proceso principalmente son las tensiones, desplazamientos, deformaciones y aceleración de cada uno de los elementos creados mediante el mallado.
- **Post-procesador:** permite la visualización y el análisis de los resultados obtenidos en el apartado anterior. Se realiza una extrapolación de los resultados individuales al conjunto general. Proporciona gráficos y animaciones en los que se puede destacar cualquier parámetro de forma individual o bien realizando una comparación entre varios para un correcto análisis de la información obtenida.

Este método presenta algunas limitaciones y fuentes de error presentes en las diferentes fases de cálculo:

- Errores en la aproximación de la geometría, ya que el programa no es capaz de definir con total exactitud la geometría real del diseño. Este error se soluciona aumentando el número de nodos, ya que de esta manera el cálculo será más exacto, sin embargo aumentará la complejidad de la resolución.
- Errores en la solución, ya que el MEF genera soluciones parciales proporcionadas por cada nodo que posteriormente habrá que ensamblar para conseguir la solución general. Además existen errores en solución de las ecuaciones debido a fallos de truncamiento en la representación interna de los números reales y por errores de redondeo.

El software utilizado para las simulaciones ha sido HyperWorks. Se ha utilizado una versión estudiante, en la cual está limitado el número de elementos que se pueden crear mediante el mallado de la estructura a 100.000 (cien mil) elementos. Esta restricción provoca que se generen mayores errores en el mallado ya que el tamaño de los elementos es mayor de lo que debería para un estudio más correcto.

5.2 Descripción del modelo numérico.

En este apartado del trabajo se va a realizar el análisis estructural de los diferentes modelos diseñados en SolidWorks.

Dicho estudio se va a llevar a cabo mediante un software de elementos finitos, a través del cual se podrá analizar los parámetros más característicos y posteriormente comparar los resultados obtenidos de las distintas simulaciones y con este procedimiento determinar que diseño es el más óptimo. Algunos parámetros de interés que se tendrán en cuenta son la masa del alerón, los desplazamientos o las tensiones que sufren las distintas partes del diseño.

Este punto se divide en tres partes. En la primera, se van a comparar los modelos entre sí para decidir cuál es el mejor. Para ello se va a utilizar el mismo material en todas las simulaciones, el cual se explicará a continuación.

Una vez se haya decidido cuál es el modelo más favorable, se procederá al análisis estructural de éste utilizando material compuesto. Este estudio forma parte del diseño preliminar del alerón, por lo que habrá partes en las que no se entrará en detalle, ya que solo éstas podrían ser objeto principal de estudio de un trabajo fin de grado. Por último, se comprobará que el diseño definitivo cumple la normativa impuesta por la FIA, la cual ha sido explicada anteriormente.

A continuación se va a explicar brevemente el proceso seguido para el cálculo estructural de los distintos modelos presentados a continuación.

La secuencia de pasos que ha sido llevada a cabo ha sido la misma en todos los modelos. A continuación se va a proceder a explicar en detalle las operaciones más importantes que son iguales para todos los modelos y aquellas que dependan de cada modelo se explicarán en sus respectivos apartados desarrollados en el siguiente apartado.

5.2.1 Pre-mallado y mallado.

El método de elementos finitos, como bien dice el nombre, consiste en el análisis estructural de pequeños elementos, por lo que la estructura queda dividida en numerosas partes. Esta división se realiza a través del mallado.

Cuanto mayor sea el número de nodos, mayor exactitud tendrá la resolución de la estructura. Sin embargo, en este trabajo, el número de elementos ha estado limitado a cien mil elementos ya que se ha utilizado una versión estudiante de Hypermesh. Esta limitación ha restringido considerablemente el proceso de mallado. Sin embargo, debido a que el tamaño de la estructura no es muy grande, el tamaño de los elementos creados ha sido correcto para el posterior análisis.

Para realizar un mallado correcto primero se ha realizado un pre-mallado en 2D y posteriormente un mallado en 3D. Este procedimiento ayuda al correcto mallado en 3D.

El mallado 2D será eliminado a continuación ya que solo sirve de apoyo y como la estructura tiene espesor, es decir se ha desarrollado en tres dimensiones, el mallado correcto es el 3D.

El tamaño de malla para todos los modelos ha sido 0.015 y se ha utilizado un tipo de malla “mixto” el cual combina estructuras cuadradas y triangulares. El motivo del uso de este tipo de malla ha sido por la geometría curva del alerón. Esta combinación geométrica ha sido la que mejor se ha ajustado a las irregularidades del ala.

Dentro de los apartados de cada modelo se podrán observar imágenes del mallado de los distintos componentes así como alguna explicación sobre mejoras en el proceso de mallado.

5.2.2 Material empleado

Para la primera parte del estudio estructural se ha utilizado el mismo material. Para las primeras simulaciones se decidió el uso de un metal. El material empleado debía cumplir unas exigencias de diseño ya que debía soportar las cargas impuestas y que presentara la menor densidad posible para que la masa total de la estructura sea la menor. Por ello, el material elegido fue el aluminio 6061-T6. Este metal está compuesto principalmente de aluminio aunque contiene pequeños porcentajes de otros metales como el cobre, magnesio o silicio. [20]

Las propiedades de este aluminio se presentan a continuación.

Tabla 7. Propiedades AL-6061-T6.

	<i>Modulo elasticidad (E)</i>	<i>Densidad (ρ)</i>	<i>ν</i>	<i>Límite elástico</i>	<i>Carga de rotura</i>
<i>Al 6061-T6</i>	69GPa	2700 Kg/m ³	0.33	270MPa	310MPa

5.2.3 Cargas aplicadas

Como ya se ha explicado anteriormente, el objetivo principal del alerón es dotar de carga aerodinámica al vehículo para poder circular a mayor velocidad sin riesgo de perder el control del vehículo o que incluso se despegue del suelo.

Sobre el alerón aparecen dos tipos de fuerzas, la carga aerodinámica y la resistencia aerodinámica. Estas cargas, al ser distribuidas sobre todo el alerón, se van a introducir en el programa en forma de una presión. El valor de estas presiones será calculado a continuación.

El vehículo con el que se pretende competir en un futuro, como se ha comentado, es un Audi TT. Este modelo es un vehículo de tracción “quattro” con motor delantero. Por ello, no se tendrá en cuenta el calor que desprende el motor del vehículo para el cálculo estructural.

Como consecuencia de esta disposición del motor, las dos únicas fuerzas que habrá que tener en cuenta son las mencionadas previamente, la carga aerodinámica y la resistencia aerodinámica.

La carga aerodinámica, será la fuerza principal que actúe sobre la estructura. Para todos los modelos estudiados, esta carga tendrá el mismo valor ya que los parámetros que intervienen en su cálculo no han sido modificados al realizar las variaciones de los modelos.

En el apartado 2.10.1.a ya se ha explicado la función que sigue esta carga y los parámetros que intervienen en la ecuación.

Para escoger un valor para la densidad del aire, se supone que el vehículo está compitiendo en condiciones normales, es decir en un ambiente con una temperatura de 25°C y 1 Bar de presión (101.325Pa). Para estas condiciones la densidad del aire es de 1,2 Kg/m³.

Para el cálculo de la velocidad del aire se tendrá que tener en cuenta tanto la posible velocidad máxima que se puede alcanzar en cada circuito como la velocidad máxima que puede alcanzar el vehículo. La de menor valor será la limitante, la cual se utilizará para el cálculo de la carga aerodinámica. Escogiendo el valor máximo que puede alcanzar el

modelo seleccionado, se está creando las condiciones más desfavorables. En el punto 2.7 se ha visto que el circuito donde se alcanza la mayor velocidad punta es 345Km/h (95,83 m/s) mientras que la velocidad punta que puede alcanzar el Audi TTS es de 280Km/h (77,7 m/s). Por lo tanto este último valor será el máximo que podrá alcanzar el vehículo en cualquier circuito, ya que es menor que todas las velocidades puntas alcanzables en los distintos recorridos.

La carga aerodinámica va a actuar sobre la parte superior del alerón. Por ello, el área sobre el que se aplica la carga se puede estimar como el producto entre la cuerda del alerón y su envergadura. Siendo la cuerda de 300mm y la envergadura de 1780mm como se ha explicado anteriormente. Con estos datos el área sobre el que actúa la carga tiene un valor de 0.534m².

Por último, el coeficiente de sustentación se obtiene del estudio aerodinámico previo explicado en el apartado 2.10.1.a. Tras la elección del perfil Ch 10 y 10° de ángulo de ataque, el coeficiente de sustentación para estas condiciones es 2.

Con estos valores, el valor de la carga aerodinámica es el siguiente:

$$F_z = \frac{1}{2} c_z \rho A v^2 = 0.5 \cdot 2 \cdot 1.2 \cdot 0.534 \cdot 77,7^2 = 3868,69\text{N}$$

Tabla 8. Resumen carga aerodinámica.

Densidad Aire	Velocidad Aire	Área alerón	Coeficiente sustentación	Carga aerodinámica
1,2 Kg/m ³	77,7 m/s	0,534 m ²	2	3868.69N

Al ser una fuerza distribuida, en el programa de elementos finitos se va a introducir esta fuerza como una presión, por lo que se tendrá que calcular este valor en unidades de presión. Dividiendo la fuerza entre el área se obtiene la presión resultante. Carga aerodinámica= 7244Pa.

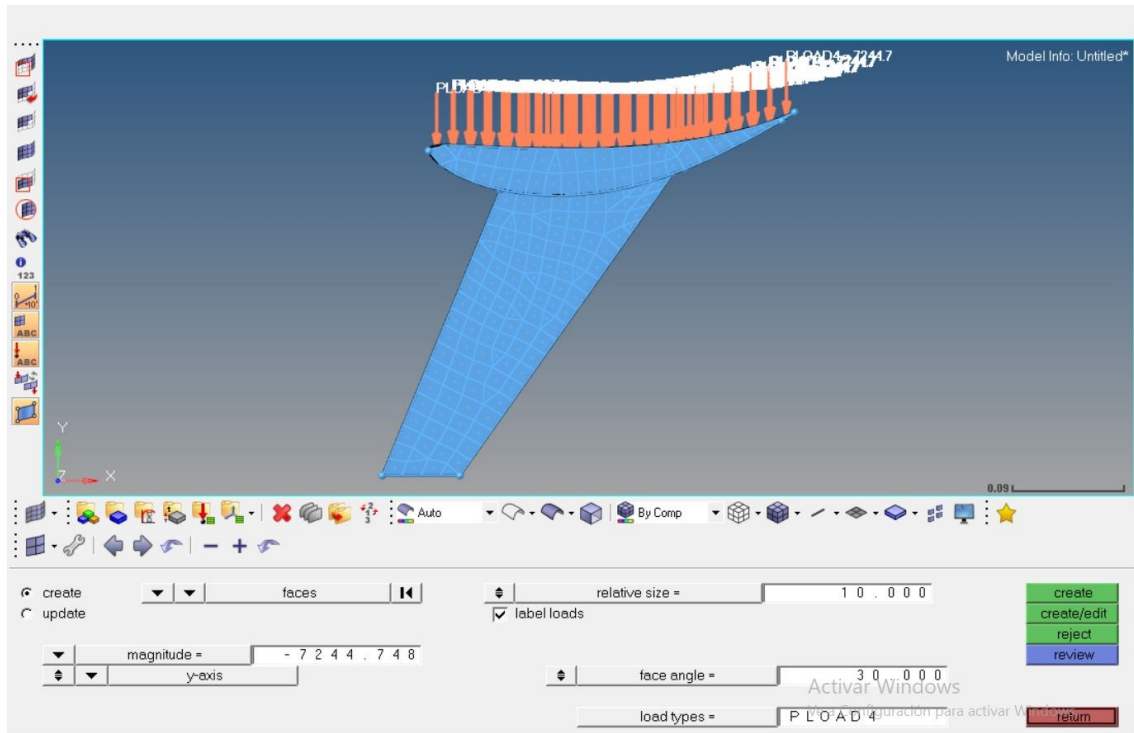


Figura 40. Carga aerodinámica.

La resistencia aerodinámica es la oposición frente al fluido que genera un cuerpo al estar en movimiento. Por ello el valor de esta fuerza dependerá del área en contacto con el fluido.

La fuerza aerodinámica viene definida por la siguiente fórmula:

$$F_D = \frac{1}{2} c_D \rho A v^2$$

La densidad y la velocidad serán las mismas que las calculas para la carga aerodinámica ya que el cálculo de ambas fuerzas se realiza en las mismas condiciones.

A diferencia de lo sucedido con la carga aerodinámica, la resistencia aerodinámica alcanzará valores distintos dependiendo del modelo estudiado y del área que se encuentre en contacto con el fluido.

La fuerza resistiva que genera el alerón será la misma para todos los modelos, ya que no cambia el ángulo de ataque entre ellos por lo que tanto el área como el coeficiente de resistencia aerodinámica permanecen constantes.

El área del alerón que se encuentra en contacto con el fluido se puede aproximar al producto entre la envergadura de éste y su altura. En este modelo la altura cuando el alerón está colocado con un ángulo de ataque de 10° tiene un valor de 81mm y la envergadura sigue siendo la misma (1780mm) por lo que el área total de contacto frontal es $0,144\text{m}^2$.

El valor del coeficiente aerodinámico que genera el alerón, el cual es determinado por su perfil y el ángulo de ataque tiene un valor de 0,12. Este valor ha sido tomado de la *Tabla 4*. Para el cálculo de la resistencia aerodinámica generada por los soportes aparecen dos valores distintos, ya que entre un modelo y otro varía el ancho de los soportes y por tanto la fuerza que actúa sobre éstos.

Por este motivo, la fuerza va a variar su valor dependiendo el modelo de estudio.

Para el primer modelo, se han montado soportes anchos con una geometría rectangular. Estos soportes tienen una anchura de 50mm y una altura total de 280mm generando un área de $0,014\text{m}^2$.

Para el resto de modelos, los soportes han sufrido una disminución de la anchura con el objetivo de recudir el peso, creando un soporte con forma de doble T siendo vista desde la parte frontal como se aprecia en la *Figura 35*. El área total de la cara frontal del soporte es $0,0037\text{m}^2$.

Sin embargo, para ambos modelos el coeficiente de resistencia aerodinámica tiene el mismo valor, ya que se aproximan los soportes como un cubo. Esta aproximación es debida a que de todas las geometrías que está representadas en la *Figura 12* la del cubo es la que más se parece al diseño de estudio. Para esta geometría el coeficiente de resistencia aerodinámica toma un valor de 1,05.

Estas fuerzas, igual que se ha hecho con la carga aerodinámica se introducirá en el programa de elementos finitos en forma de presión uniforme, para ello habrá que dividir la fuerza entre el área de contacto entre elemento y fluido.

Tanto los parámetros que intervienen en la fórmula como los valores de las fuerzas y de las presiones de las distintas variaciones de modelos se presentan en la siguiente tabla.

Tabla 9. Resumen resistencia aerodinámica.

	DENSIDAD	VELOCIDAD DEL AIRE	ÁREA EN CONTACTO CON EL FLUIDO	COEFICIENTE RESISTENCIA AERODINÁMICA.	RESISTENCIA AERODINÁMICA.	RESISTENCIA AERODINÁMICA EN TÉRMINOS DE PRESIÓN.
ALERÓN	1,2 Kg/m ³	77,7 m/s	0,144m ²	1,05	232,12N	1592.84 Pa
SOPORTE ANCHO	1,2 Kg/m ³	77,7 m/s	0,014m ²	1,05	53,13N	3803,49 Pa
SOPORTES ESTRECHOS	1,2 Kg/m ³	77,7 m/s	0,0037m ²	1,05	11,81N	3169,58 Pa

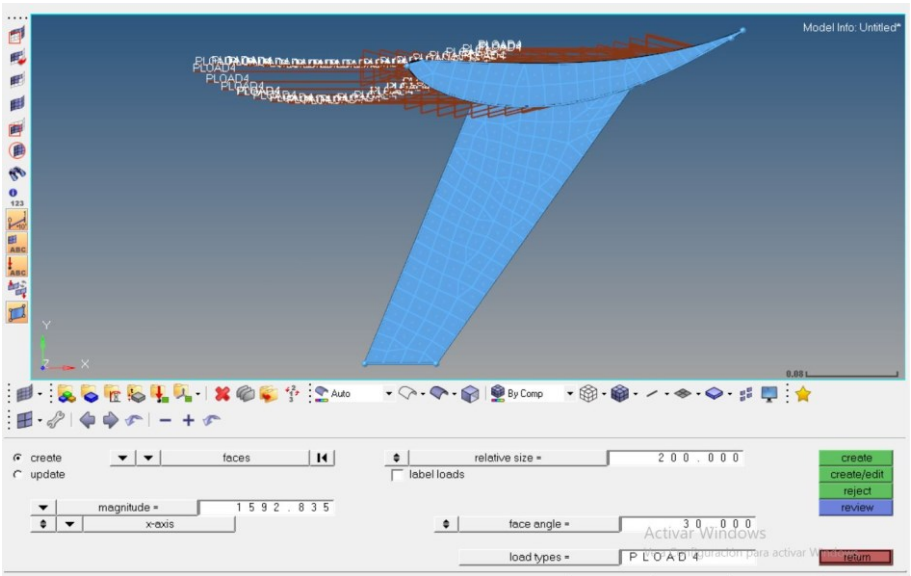


Figura 41. Resistencia aerodinámica alerón.

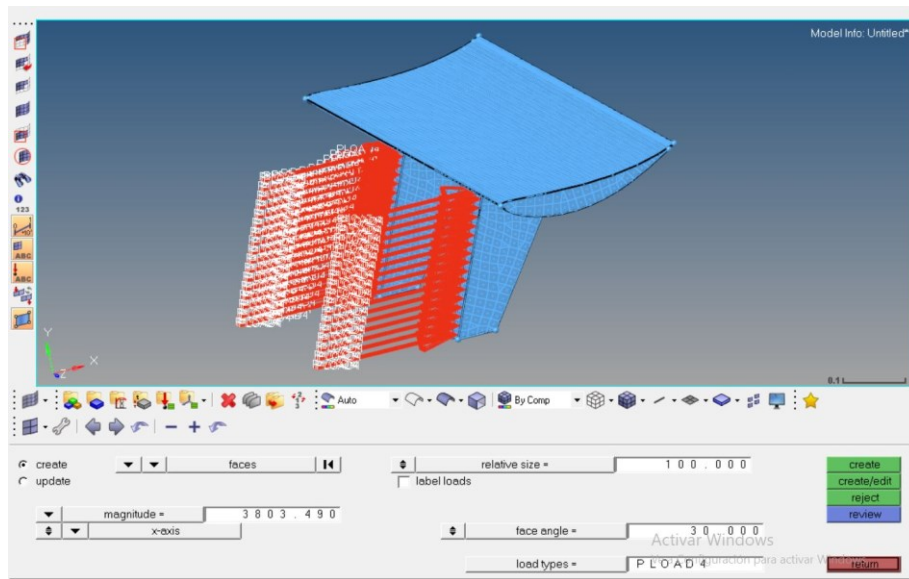


Figura 42. Resistencia aerodinámica soportes anchos.

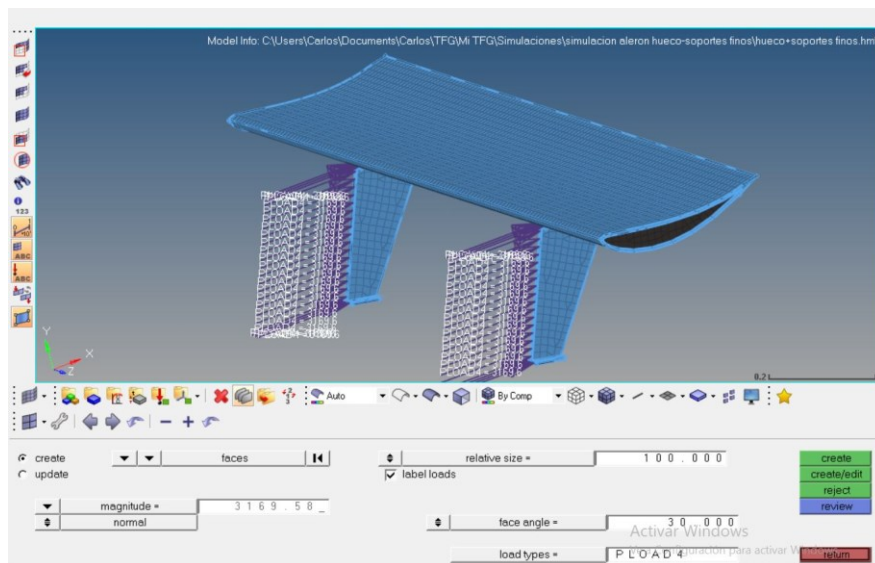


Figura 43. Resistencia aerodinámica soportes estrechos.

5.2.4 Restricciones cinemáticas

Dentro de las condiciones de contorno, además de las cargas que actúan sobre el alerón es importante definir las restricciones que actúan sobre la estructura. En este apartado se limitan los grados de libertad de los elementos que se quieran restringir.

En la estructura objeto de estudio se colocarán dos apoyos en la parte inferior de los soportes limitando así su movimiento. Estos apoyos se colocan ya que los soportes irán unidos al chasis del vehículo por lo que el desplazamiento de estas superficies estará impedido.

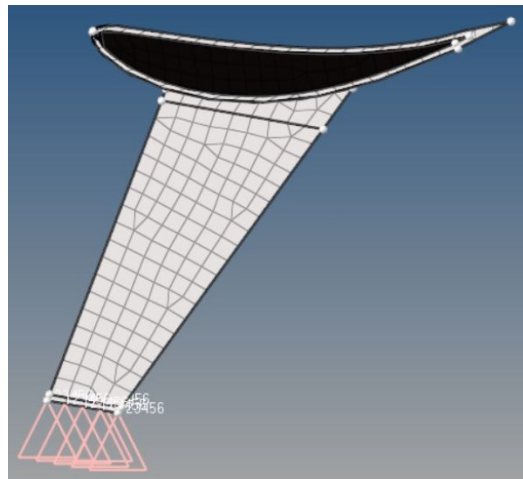


Figura 44. Restricción cinemática.

Capítulo 6. Análisis estructural.

6.1 Modelos analizados

A continuación se presenta la primera parte del estudio estructural realizado para la elección final del modelo preliminar del alerón.

En este apartado se van a comparar cuatro diseños preliminares. (Ver *Figura 45*).

Se estudiará de inicio un modelo simple y a partir de éste se realizarán variaciones en distintos parámetros de diseño para conseguir un modelo mejorado. Posteriormente se comprobará que el modelo elegido cumpla el reglamento, el cual ha sido explicado en el apartado 2.6.2.

Como ya se ha comentado, el software utilizado está limitado a cien mil elementos, por lo que para el correcto análisis de las estructuras, los modelos realizados anteriormente sufrirán simplificaciones en su diseño para facilitar las simulaciones ya que al estar restringido el número de elementos, es probable que el tamaño de la malla sea excesivo para el correcto análisis de geometrías complejas.

Para el estudio de estos cuatro diseños se va a utilizar el mismo material, explicado en 5.2.2.

Posteriormente, una vez elegido el modelo más óptimo y comprobado que cumple el reglamento, se simulará este mismo diseño utilizando material compuesto. Con este procedimiento se podrán observar las diferencias entre ambos materiales.

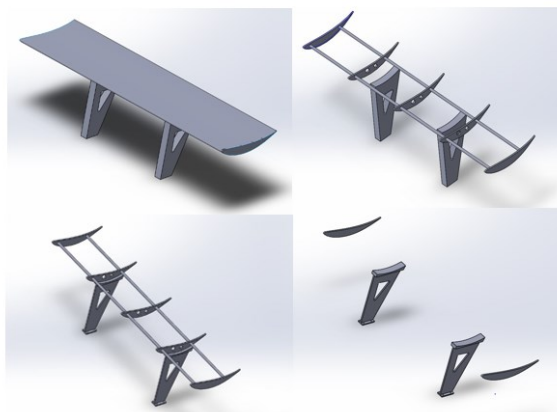


Figura 45. Cuatro modelos estudiados.

6.2 Simulación del primer modelo.

La estructura presentada en este diseño consiste en un alerón macizo, fabricado completamente en aluminio.

Este modelo ha sido el punto de inicio a partir del cual se realizó la primera simulación y posteriormente las diferentes mejoras. El vaciado de los soportes se ha eliminado para facilitar la simulación.

Como se ha comentado anteriormente, el primer paso será realizar los respectivos mallados. Primero uno 2D y posteriormente el 3D el cual se puede apreciar en la siguiente figura.

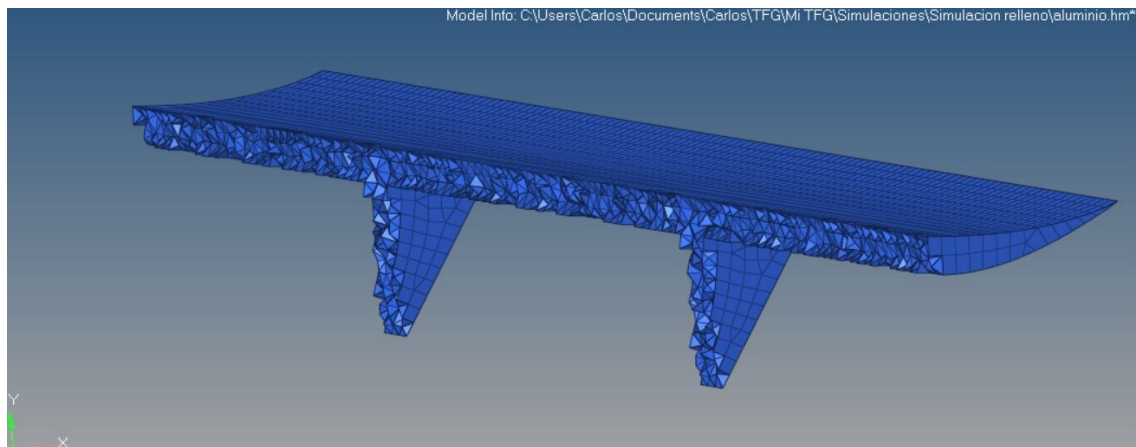


Figura 46. Malla 3D del primer modelo.

Tras realizar el mallado y definir las condiciones de contorno ya se puede iniciar la simulación del primer modelo. De todos los resultados que el programa calcula, se van a tener en cuenta el desplazamiento vertical, la tensión máxima y el peso de la estructura.

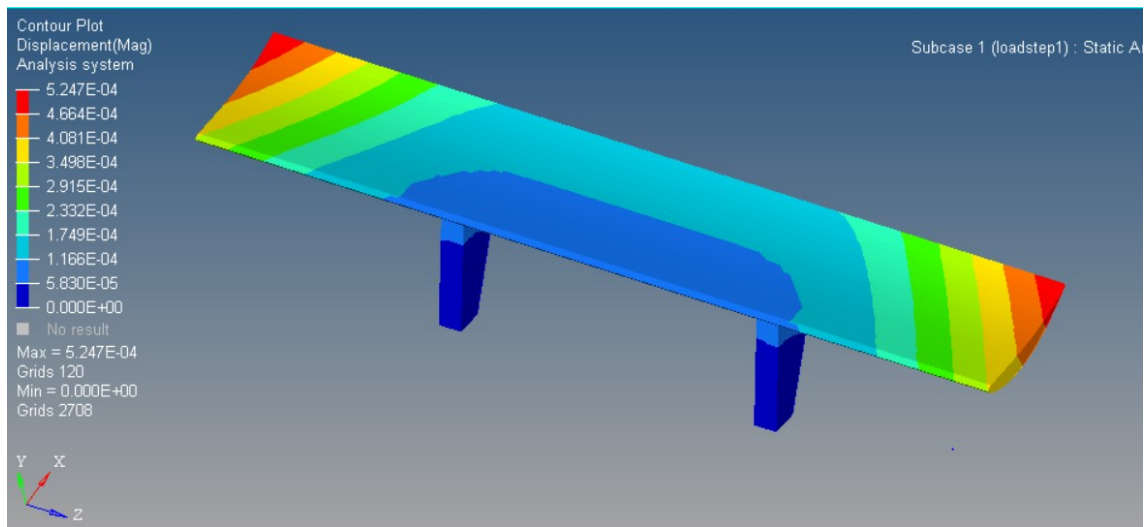


Figura 47.Desplazamientos modelo 1.

En la *Figura 47* se observa que el desplazamiento máximo que sufre el alerón es de 0,5247mm. Este desplazamiento máximo se produce en los extremos del alerón y en las zonas que se encuentran más alejadas de los apoyos.

El valor de este desplazamiento es muy pequeño, por lo que sería un desplazamiento aceptable.

Otro de los datos que hay que analizar es la tensión máxima que se genera en la estructura. Este valor es muy importante ya que hay que asegurarse de que siempre es menor que el límite elástico para que la estructura no entre en régimen plástico.

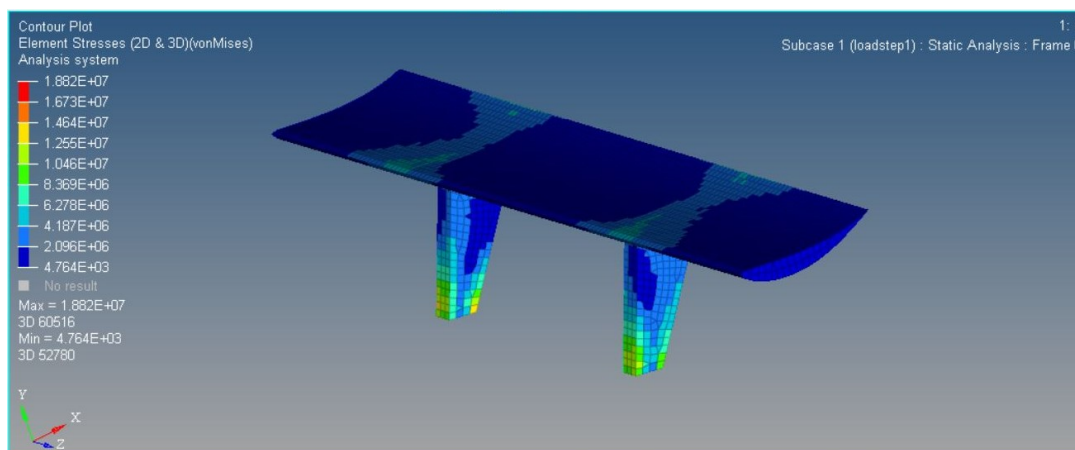


Figura 48 Tensión del modelo 1 según Von Mises. Vista delantera.

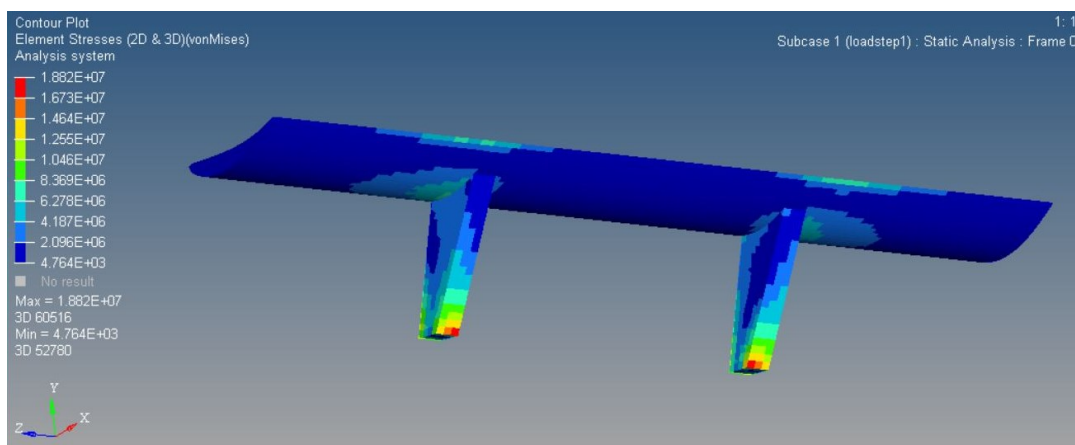


Figura 49. Tensión máxima del modelo 1 según Von Mises. Vista trasera.

En las *Figura 48* y *Figura 49* se observa que la máxima tensión según Von Mises alcanzada en la estructura es de 18,82 MPa. Este valor es menor que el límite elástico del material (270 MPa) por lo que la estructura no entra en régimen plástico.

Tras comprobar que el modelo sufre un desplazamiento aceptable y sigue comportándose en régimen elástico tras la imposición de las cargas, el siguiente valor a tener en cuenta es la masa del diseño.

Este primer diseño tiene una masa de 43,094 Kg como se aprecia en la siguiente figura.

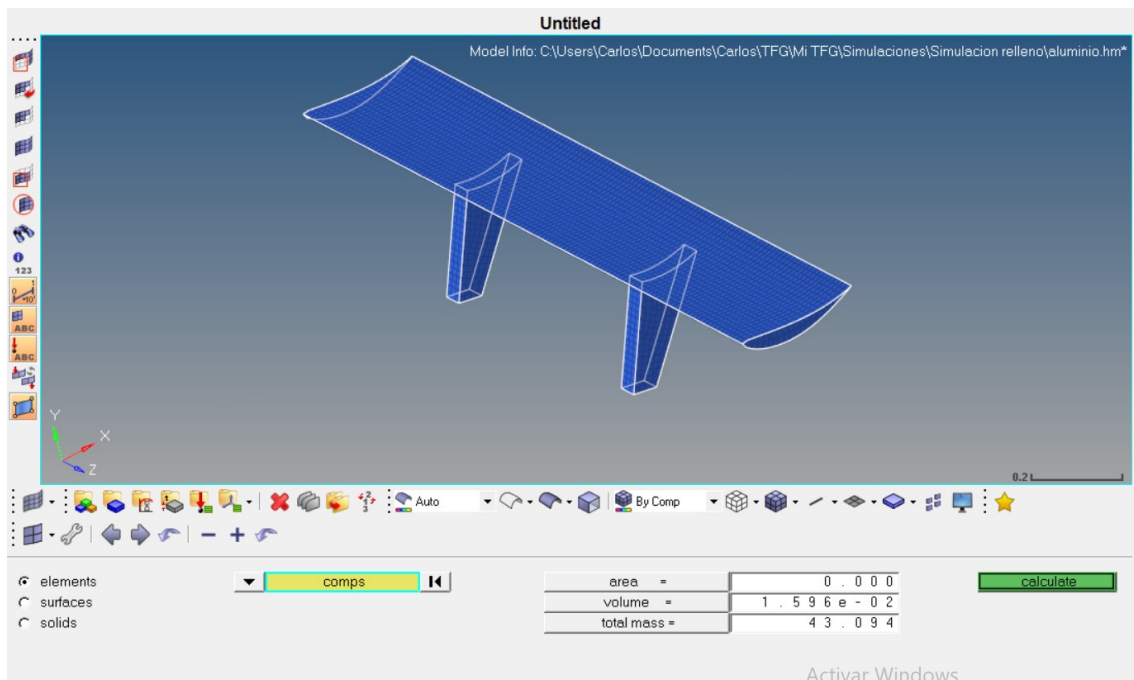


Figura 50.Masa modelo 1.

Tabla 10. Resumen resultados del modelo 1.

<i>Desplazamiento</i>	<i>Tensión Máxima</i>	<i>Masa</i>
0,5247mm	18,82MPa	43,094Kg

La masa de este primer diseño es elevada, por lo que reducir el peso de los diseños será el objetivo principal que se ha pretendido conseguir en los siguientes diseños.

6.3 Simulación del segundo modelo

Tras la simulación del primer diseño y el posterior análisis de los resultados se observó que el valor limitante era el peso de la estructura, ya que los otros dos parámetros cumplían las exigencias de diseño.

Antes de empezar a simular la estructura presentada en el apartado 4.4 se realizaron algunas modificaciones de diseño con el objetivo de simplificar la estructura. Se han eliminado los vaciados de los soportes y de las costillas al igual que los largueros que cubren toda la envergadura del alerón.

Para la simplificación de la estructura El diseño simplificado preparado para simular es el siguiente.

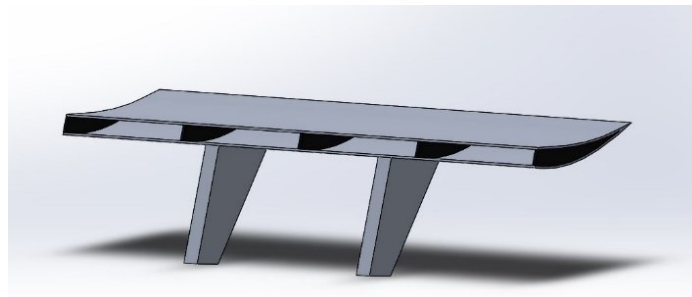


Figura 51. Diseño alerón con costillas simplificado para simular.

El procedimiento de simulación de este modelo va a ser muy parecido al anterior pero con la peculiaridad de que la estructura actual está formada por seis componentes, los cuales habrá que mallar de forma individual.

El mallado de las costillas que realiza el programa automáticamente, no es demasiado exacta debido a la geometría de ésta. En las dos figuras que se presentan a continuación se observa cómo en el borde de ataque del perfil de la costilla, el cual es el mismo que el del alerón, el mallado no se completa a lo largo de la curva por lo que no es correcto. Para solucionar este problema, se introduce de forma manual dos nuevos nodos, los cuales se unen con una línea. Estos tres componentes ayudan al programa a realizar el mallado en esa zona, sirve de guía.

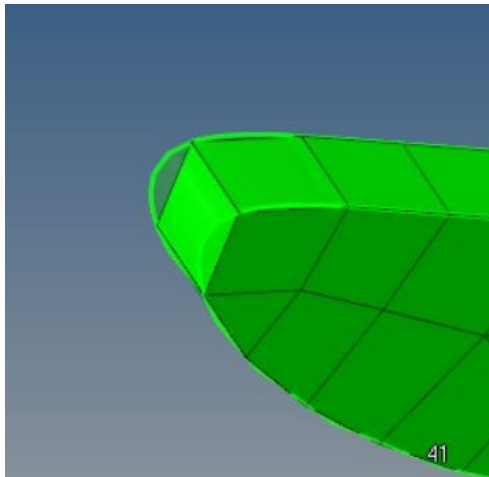


Figura 52. Fallo en el mallado de una de las costillas.
de la costilla.

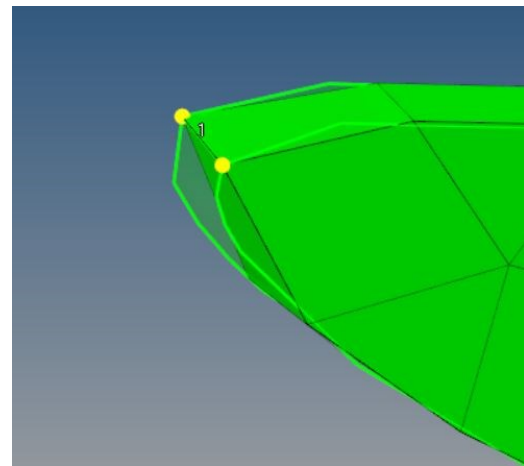


Figura 53. Arreglo de mallado de la costilla.

Tras esta modificación ya es posible la correcta realización del mallado, el cual se observa en la siguiente figura.

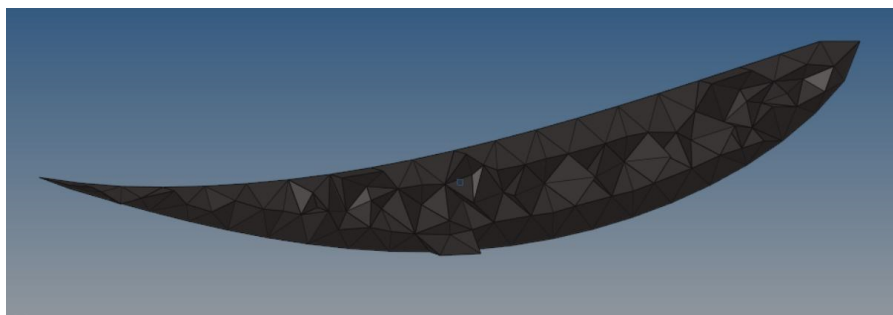


Figura 54. Mallado 3D costilla. Vista sección.

Para este modelo los apoyos siguen siendo de espesor constante y se encuentran distanciados entre sí 650mm por lo que las condiciones de contorno serán idénticas a las impuestas en el modelo anterior.

Este diseño está formado por 6 componentes, por lo que hay que definir el tipo de contacto entre ellos. Para esta simulación se ha escogido un contacto tipo “freeze”. Esta elección es debida a que el contacto entre todos los componentes ha de ser fijo, impidiendo cualquier tipo de desplazamientos entre ellos.

Los resultados obtenidos tras la simulación son los siguientes.

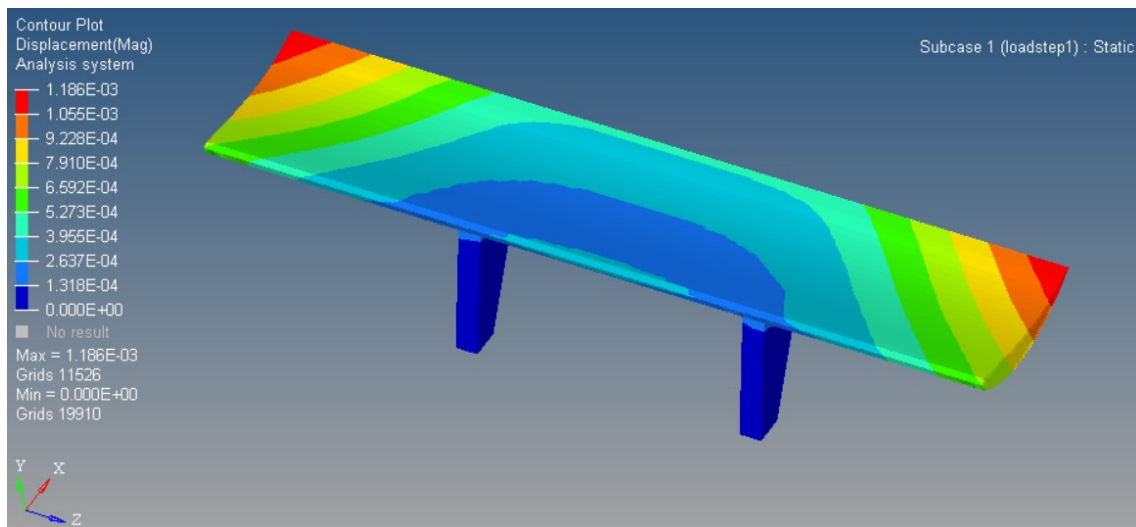


Figura 55. Desplazamientos modelo 2.

El modelo 2 ha sufrido un desplazamiento de 1,186mm. Este desplazamiento es el doble del sufrido por el modelo 1. El motivo de que se duplique el valor del desplazamiento es que al haber realizado un vaciado en el interior del alerón, éste ha perdido robustez y en los puntos más extremos aumenta el desplazamiento. Sin embargo, este valor calculado sigue siendo pequeño por lo que es un resultado aceptable.

La tensión máxima según Von Mises en este modelo es de 26,4MPa. Se produce esta tensión en la parte posterior del alerón en la zona de unión entre el apoyo y el alerón, como se observa en la *Figura 57*. En el diseño anterior, al estar macizo por entro, esa región no era una zona de concentración de tensiones como ocurre en este modelo.

Este valor sigue siendo menor que el límite elástico del aluminio (310Mpa) por lo que no entrará en régimen plástico.

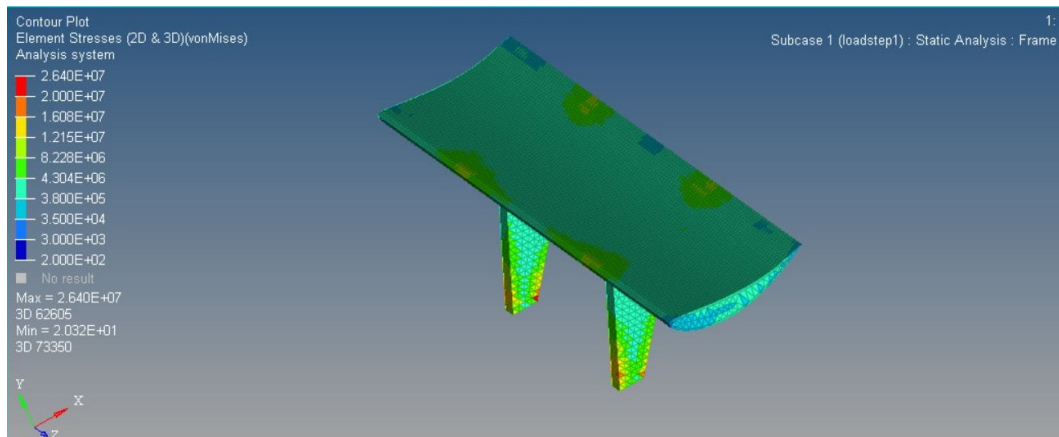


Figura 56. Tensión del modelo 2 según Von Mises. Vista delantera.

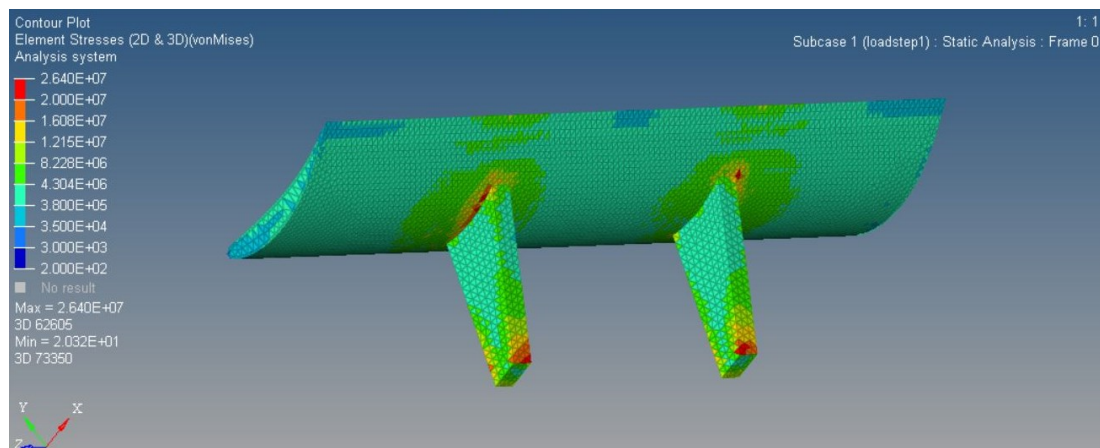


Figura 57. Tensión del modelo 2 según Von Mises. Vista trasera.

El objetivo principal de la variación de la idea de diseño ha sido la reducción de peso del conjunto. A continuación se observa que se ha conseguido reducir el peso un 42,7% siendo la masa de este modelo igual a 24,663 Kg

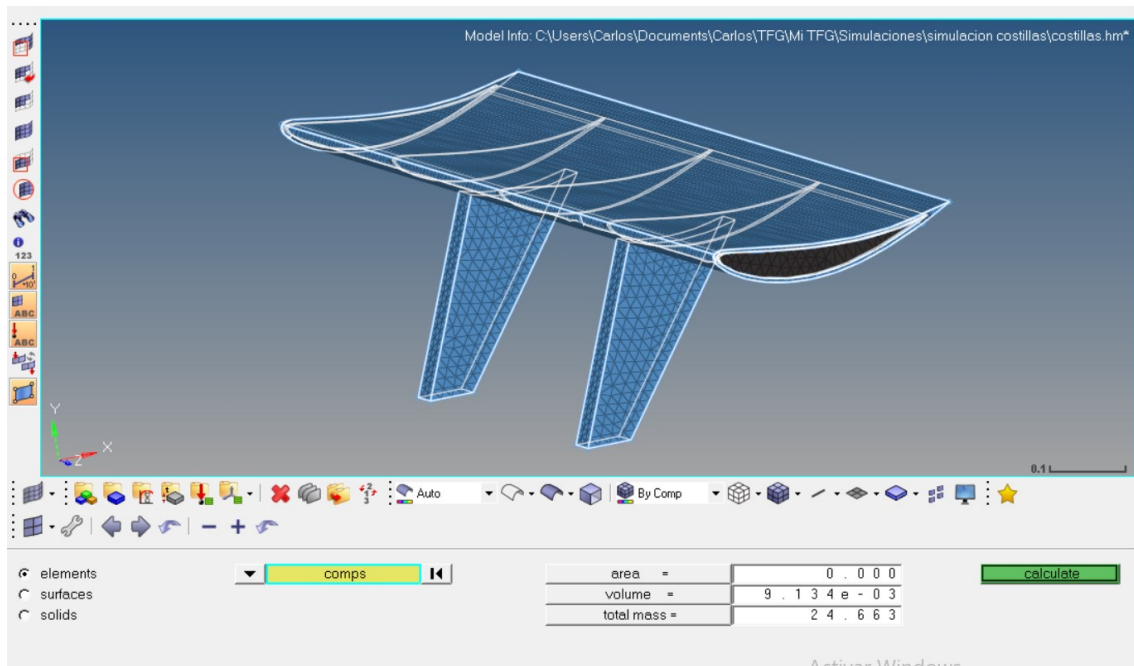


Figura 58. Masa modelo 2.

Tabla 11. Resumen resultados del modelo 2

<i>Desplazamiento</i>	<i>Tensión Máxima</i>	<i>Masa</i>
1,186mm	26,4MPa	24,663Kg

6.4 Simulación del tercer modelo.

Tras la simulación del segundo modelo y viendo la disminución del peso y manteniendo los otros dos parámetros en valores razonables se decidió intentar seguir mejorando el diseño, disminuyendo el peso y haciendo cumplir los demás requisitos.

Como se ha visto anteriormente, la tensión máxima según Von Mises del modelo 2 se alcanza en la zona de unión entre los soportes y el alerón. Este es el motivo por el cual se ha aumentado la distancia de separación entre los soportes haciéndolos coincidir con las costillas, de esta forma se eliminan la zona de concentración de tensiones.

Además, otra de las zonas donde se alcanzaban grandes tensiones es en la parte inferior de los apoyos, donde se encuentra la restricción cinemática que impide el movimiento de la estructura. A pesar de generarse grandes tensiones, éstas están lejos del límite elástico por lo que con el objetivo de seguir reduciendo el peso, se rediseñaron los soportes, los cuales pasan a tener una geometría de “doble T”. Este ha sido el motivo del cambio de la geometría. En este modelo, dado la variación de la geometría que han sufrido los soportes, la correcta generación de la malla será de vital importancia para la obtención de unos resultados correctos.

En este modelo, al variar el área de los soportes, va a variar la fuerza de resistencia aerodinámica que actúa sobre éstos como ha sido explicado anteriormente.

El desplazamiento máximo obtenido en estas condiciones de diseño ha sido de 2,067mm. Este valor es muy parecido al anterior ya que las modificaciones que ha sufrido el diseño no afectan considerablemente al desplazamiento.

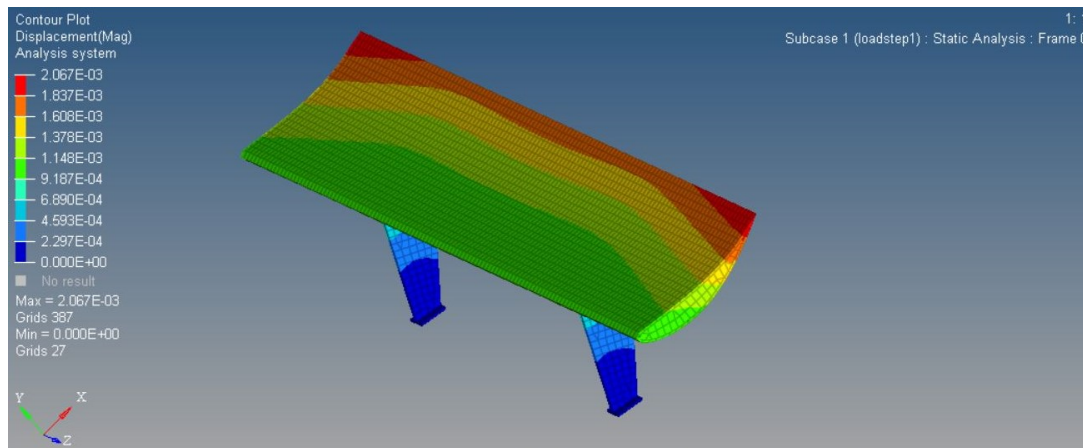


Figura 59. Desplazamientos del modelo 3.

A diferencia de los desplazamientos, la tensión máxima según Von Mises sí que ha sufrido importantes variaciones respecto las del modelo anterior. Como se puede observar en la *Figura 60* al haber desplazado los apoyos a la altura de las costillas, se ha eliminado la zona de concentración de tensiones y no se producen en esa área las tensiones máximas.

Sin embargo, la tensión máxima ha aumentado considerablemente respecto los modelos anteriores. Este aumento es debido a la reducción del área que han sufrido los soportes. A pesar de haberse incrementado la tensión máxima, no es un resultado negativo ya que sigue estando por debajo del límite elástico del aluminio por lo que se ha conseguido reducir el peso y ajustar más la tensión máxima al límite elástico.

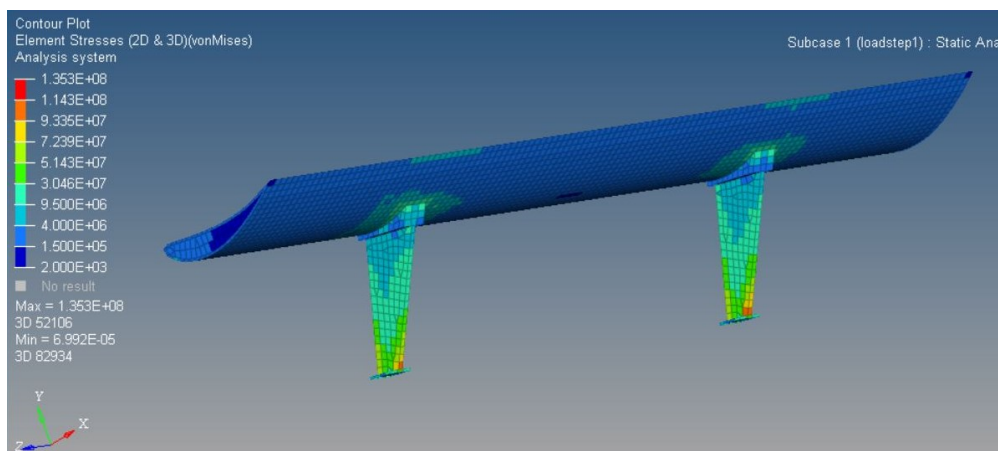


Figura 60. Tensión según Von Mises del modelo 3. Vista trasera.

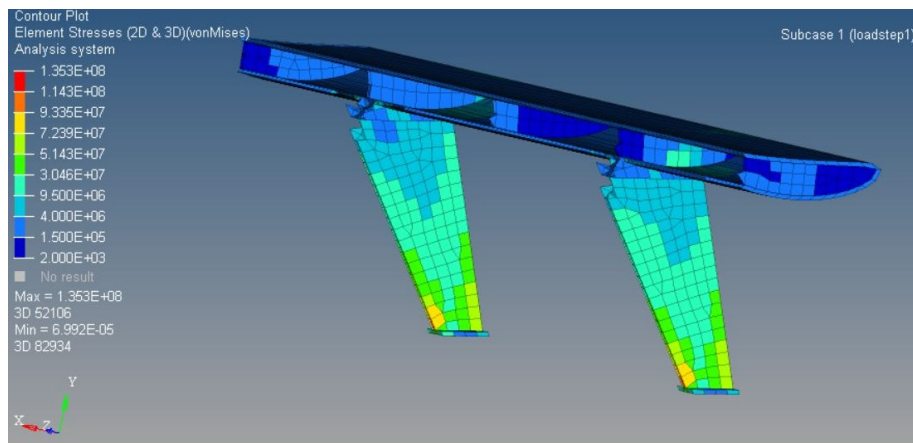


Figura 61. Vista en sección de la tensión máxima según Von Mises.

La masa de esta estructura ha disminuido considerablemente respecto al modelo anterior, alcanzando un valor de 19,144Kg

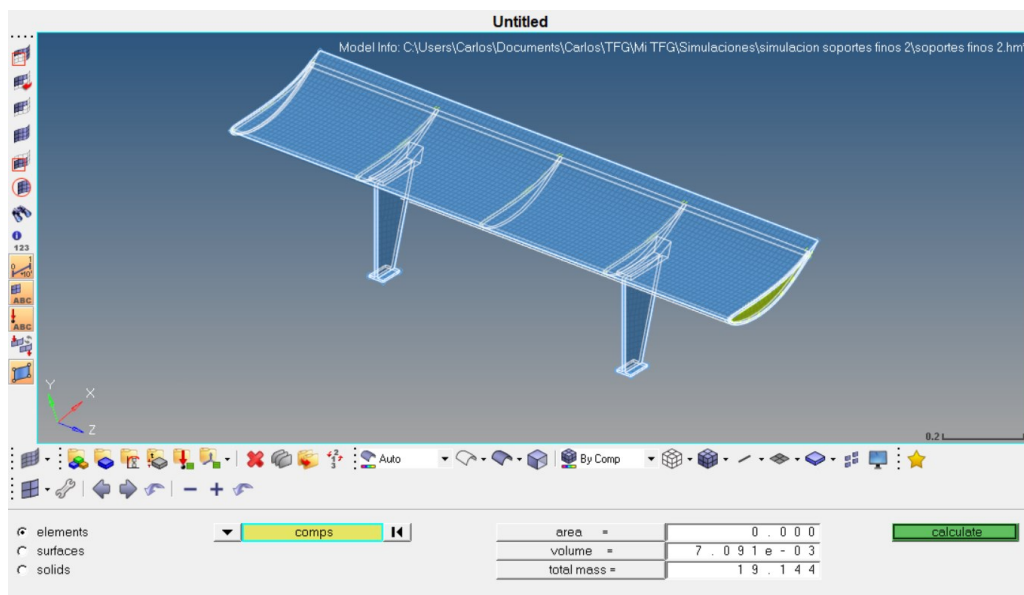


Figura 62. Masa del modelo 3.

Tabla 12. Resumen resultados modelo 3.

<i>Desplazamiento</i>	<i>Tensión Máxima</i>	<i>Masa</i>
2.067mm	135,3MPa	19,144Kg

6.5 Simulación del cuarto modelo.

Como se puede observar en la figura anterior, las costillas no soportan los mayores esfuerzos de la estructura y complican sustancialmente la fabricación del modelo, por lo que el siguiente modelo que se ha diseñado ha consistido en un modelo totalmente hueco con dos únicas costillas al inicio y fin del alerón, para cerrar la estructura, alejándose de la idea del ala de un avión.

Los soportes continúan siendo los más estrechos y la separación entre estos se mantiene en 855mm.

Las condiciones de contorno son idénticas a las del modelo anterior.

El desplazamiento máximo obtenido ha sido de 1,769mm. Este valor está muy aproximado a los calculados anteriormente.

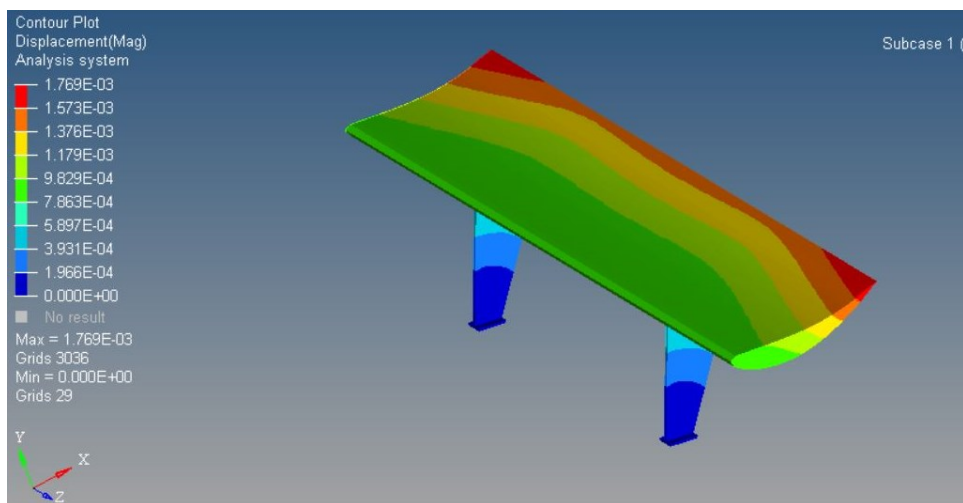


Figura 63. Desplazamientos modelo 4.

La tensión máxima según Von Mises se sigue produciendo en la misma zona que en los modelos anteriores siendo ésta 104,5 MPa. Al reducirse los componentes de la estructura, de seis a tres, y como consecuencia la masa total, también se ve reducida la tensión máxima alcanzada.

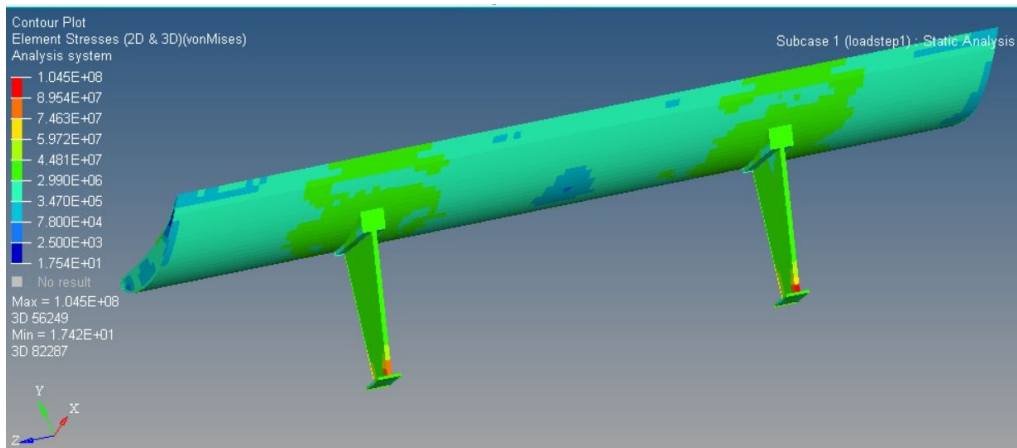


Figura 64. Tensión máxima según Von Mises del modelo 4.

En la siguiente se afirma lo que era claramente imaginado, la masa total del conjunto se iba a reducir. Concretamente más de 0,5Kg se ha reducido al eliminar las tres costillas intermedias.

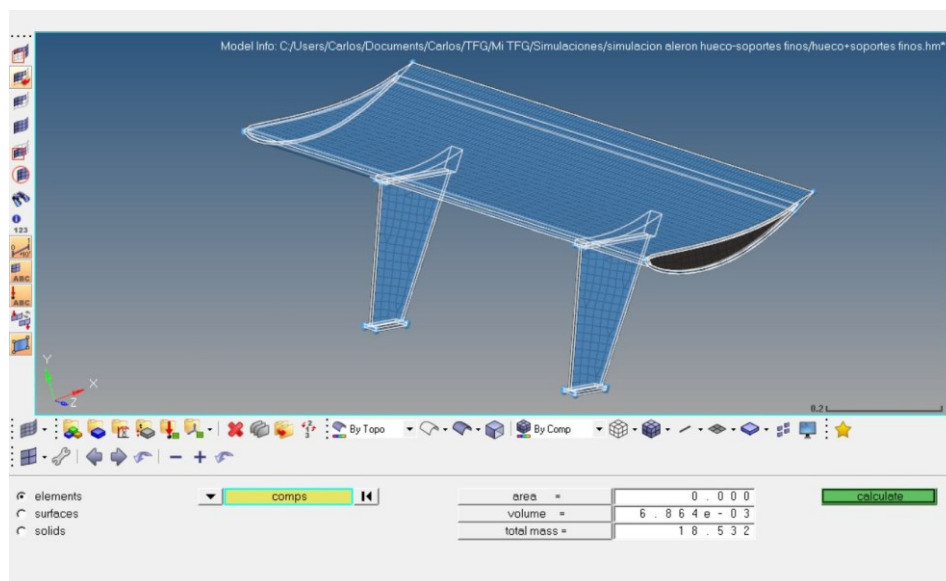


Figura 65. Masa modelo 4.

Tabla 13. Resumen resultados modelo 4

<i>Desplazamiento</i>	<i>Tensión Máxima</i>	<i>Masa</i>
1.769mm	104,5MPa	18,532Kg

6.6 Comprobación reglamento.

Tras las simulación de los cuatro diseños, se ha llegado a la conclusión de que el modelo más óptimo es el cuarto ya que es el más ligero. Además, a pesar de sufrir mayores desplazamientos y tensiones que los dos primeros modelos, estos valores son aceptables.

A continuación se comprobará que este último modelo cumple la normativa impuesta por la FIA, la cual está explicada en 2.6.2.

Este ensayo consiste en aplicar una carga puntual de valor 2400N en distintos puntos del alerón y analizar el desplazamiento que sufre la estructura.

Si el desplazamiento es menos que 10mm será un modelo aceptable y cumplirá la normativa impuesta.

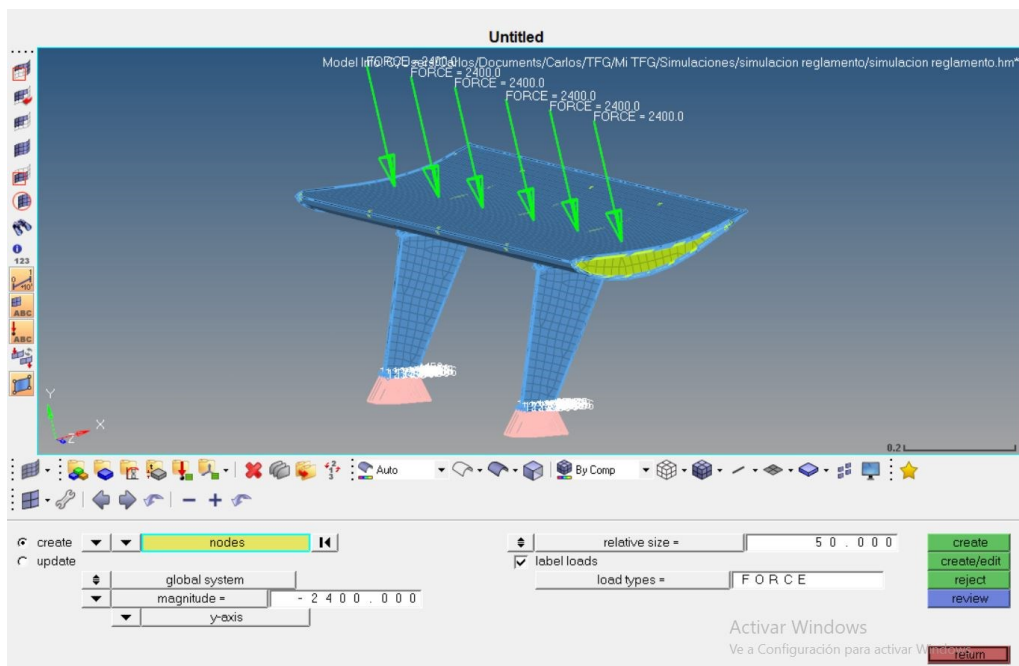


Figura 66. Cargas impuestas por el reglamento.

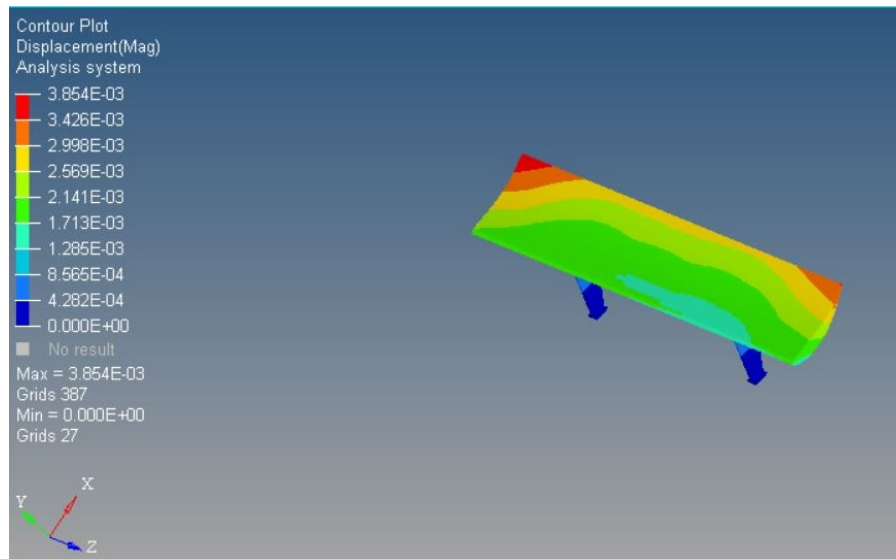


Figura 67. Deformación modelo 4. Condiciones reglamento.

Como se aprecia en la figura anterior el desplazamiento máximo es de 3,854mm por lo que este diseño cumple las condiciones impuestas por la FIA.

Por lo tanto el modelo final elegido para el pre-diseño del alerón es el cuarto.

6.7 Cambio de material.

Tras los procesos de diseño y de simulaciones presentados en los apartados anteriores se ha propuesto un cambio de material y analizar los resultados para poder comprobar los beneficios o desventajas del uso de otro material.

Actualmente la mayoría de los componentes que se montan en los automóviles de competición están fabricados en material compuesto debido a sus buenas propiedades mecánicas y su bajo peso.

Es por ello que en este apartado se va a comparar el diseño elegido en el apartado anterior, el modelo 4, el cual se fabricaría en aluminio, con otro con una estructura idéntica pero fabricado en material compuesto.

Sin embargo, para la simulación del modelo de material compuesto aparece una restricción importante impuesta por el reglamento. Como se ha comentado en el punto 2.6.1, los soportes verticales tienen que estar fabricados en un material metálico, por lo que para este apartado se realizará la simulación únicamente del alerón, objeto de estudio de este trabajo y no del conjunto formado por el alerón + soportes.

Para el correcto análisis de los resultados y que sea posible la comparación entre ambos modelos, se va a realizar de nuevo la simulación del modelo cuatro, esta vez sin soportes.

6.7.1 Modelo definitivo fabricado en aluminio.

El procedimiento seguido en esta simulación ha sido la misma en que en los modelos anteriores con la diferencia de que al no existir apoyos las restricciones cinemáticas han sido impuestas directamente en el alerón, en la zona de contacto entre los soportes y el mismo de los casos anteriores.

El desplazamiento máximo obtenido ha sido de 0.3479mm. Este valor es ligeramente menos que el obtenido en la simulación anterior ya que al no incluir los soportes en este modelo, tampoco se ha incluido la fuerza de resistencia al avance que estos generaban, fuerza que incrementaba el desplazamiento del conjunto.

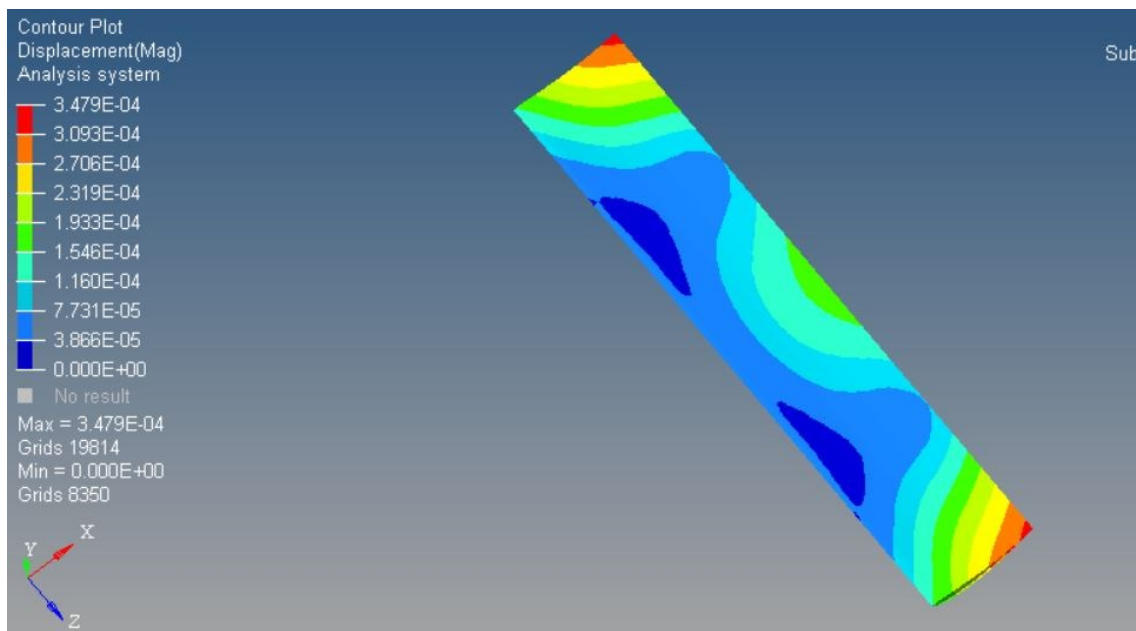


Figura 68. Desplazamiento modelo para comparar en aluminio.

En esta simulación al no estudiarlos soportes, la tensión máxima va a aparecer en el ala. La zona donde se han situado los apoyos, es decir, la zona de contacto entre ala y soportes, es un área de concentración de tensiones, por lo que las tensiones máximas se van a generar en esta zona, alcanzando un valor máximo de 21,2 Mpa.

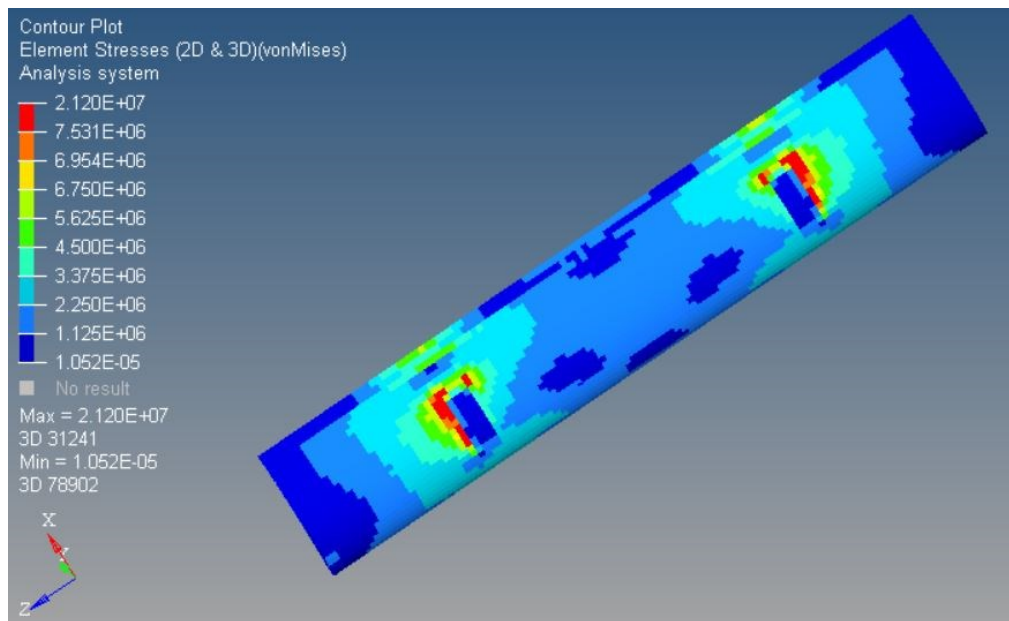


Figura 69. Tensiones máximas según Von Mises. Vista trasera.

En la imagen se puede observar con claridad las zonas donde las tensiones son máximas, así como el valor máximo. Éste, al igual que en las anteriores simulaciones, es menor que el límite elástico, por lo que el alerón se encontrará en régimen elástico.

La masa del conjunto, como era de esperar, se ha reducido respecto el modelo anterior, tomando un valor de 16,62Kg.

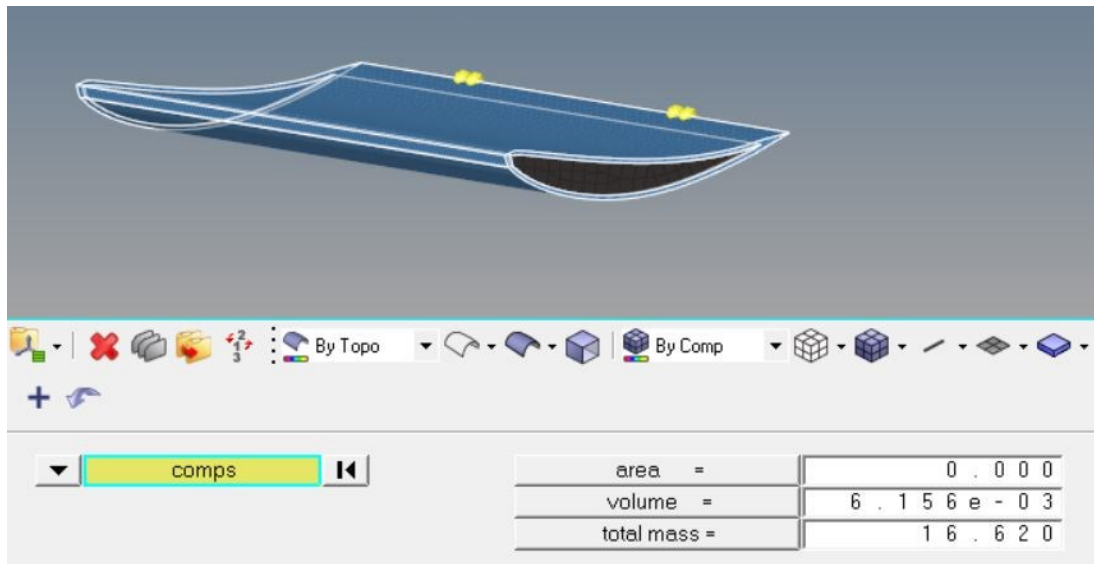


Figura 70. Masa modelo aluminio.

Este último valor será de vital importancia al realizar comparativa entre ambos materiales.

6.7.2 Modelo definitivo fabricado en material compuesto.

El primer paso antes de realizar la simulación ha sido la elección del material del cual va a estar fabricado el alerón.

De todos los tipos de material compuesto que existen, se ha elegido la fibra de carbono AS4. Esta fibra es muy utilizada en la industria aeroespacial y automovilística. Se caracteriza por un excelente comportamiento a corrosión, resistencia a fatiga con un peso muy ligero, elevados valores de rigidez y alta resistencia mecánica. Es siete veces más resistente que el aluminio. [21] [22]

Las propiedades de esta fibra de carbono están recogidas en la siguiente tabla.

Tabla 14. Propiedades fibra de carbono AS4. [22]

$S_{xx}^T = 1800MPa$	$G_{yz} = 3500MPa$	$\nu_{yz} = 0.32$
$S_{xx}^C = 1300MPa$	$G_{xy} = G_{xz} = 5000MPa$	$\nu_{xy} = \nu_{xz} = 0.3$
$E_{xx} = 141300MPa$		$\alpha_{xx}^t = -1 \times 10^{-6}C^{-1}$
$E_{yy} = E_{zz} = 9580MPa$		$\alpha_{yy}^t = \alpha_{zz}^t = 26 \times 10^{-6}C^{-1}$

El objetivo del apartado 6.7 es comparar dos modelos idénticos cambiando el material, es por ello que para el diseño de las capas de las fibras de material compuesto se ha tenido en cuenta el espesor total del modelo anterior, el cual tenía 5mm.

Por ello, se han diseñado cinco capas de material compuesto de 1mm cada una. A parte del espesor de las capas, otro parámetro importante y que hay que determinar es la orientación de las fibras, ya que combinando distintas orientaciones se consiguen mejores propiedades. Las cinco capas están orientadas a $0^\circ, 45^\circ, 90^\circ, -45^\circ$ y 0° respectivamente.

Los resultados obtenidos han sido los siguientes.

El desplazamiento máximo obtenido ha sido de 0,9377mm. Este resultado es mayor que el obtenido anteriormente y se origina en una posición más alejada del borde de salida del alerón, esta diferencia entre ambos modelos es debida a que el modelo diseñado en material compuesto no tiene costillas en los extremos, esto es debido a que el diseño está pensado para la futura fabricación, y las costillas impedirían dicho procedimiento.

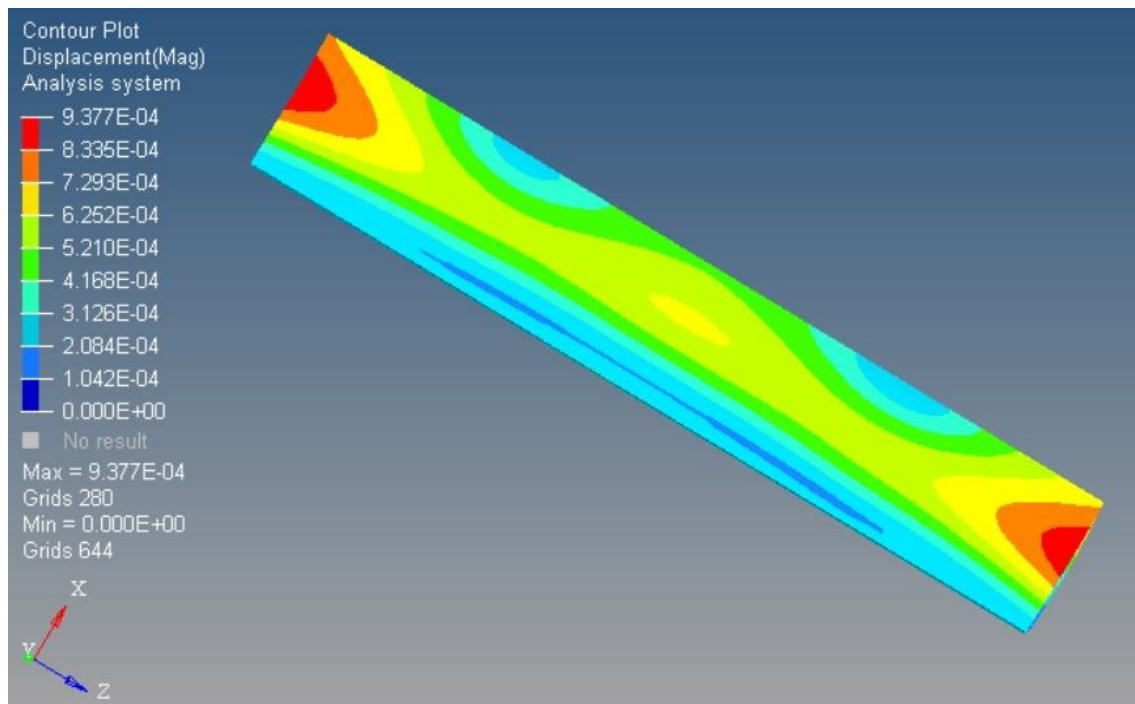


Figura 71. Desplazamientos modelo fabricado en carbono.

La tensión máxima que se alcanza en el alerón es de 50,83MPa este valor está muy alejado del límite elástico de la fibra de carbono 1,74Gpa, por lo que la estructura se encuentra en régimen elástico.

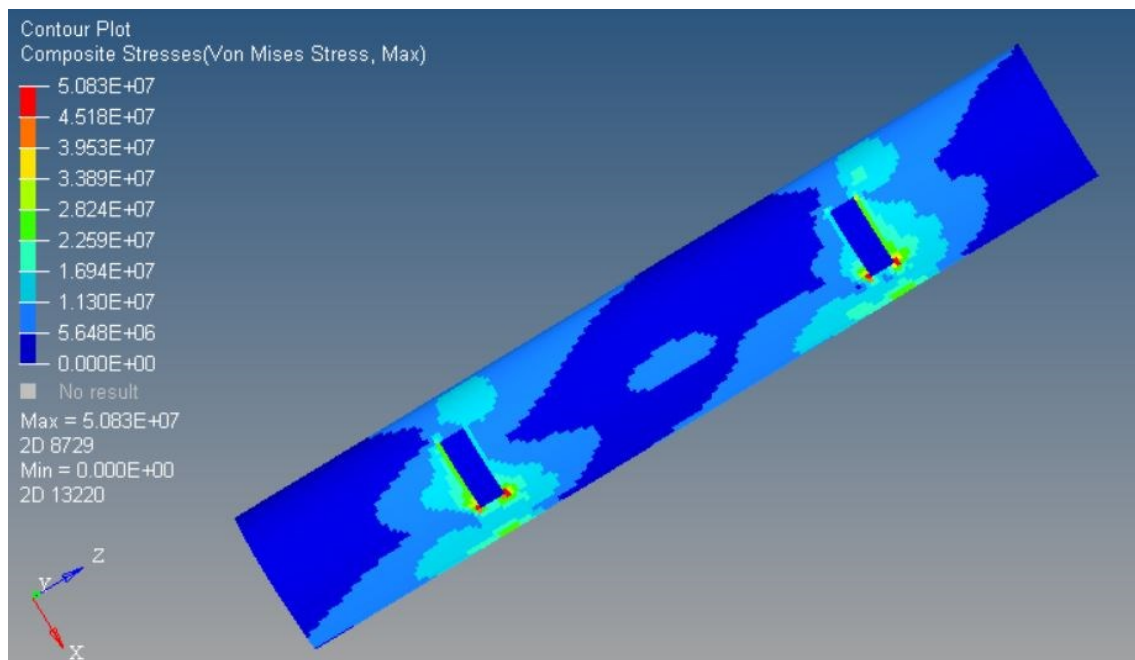


Figura 72. Tensión máxima según Von Mises.

En la imagen se puede observar perfectamente la zona de los apoyos, donde la tensión es mínima, sin embargo, justo en la zona donde éstos acaban se origina la tensión máxima creándose en esa zona una concentración de tensiones.

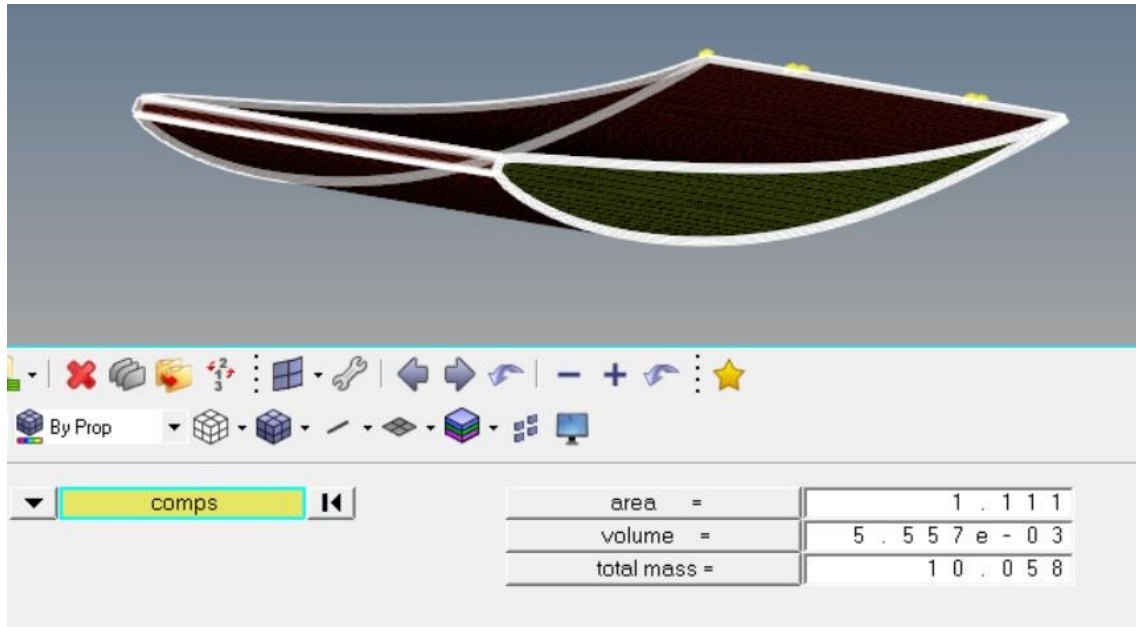


Figura 73. Masa modelo fibra de carbono.

La masa de este modelo simulado en fibra de carbono ha sido de 10,058Kg

Capítulo 7. Presupuesto.

7.1 Introducción.

En el presente capítulo se especifican los costes asociados a la elaboración del estudio realizado. Como se ha ido indicando a lo largo del trabajo, se trata de un estudio preliminar y faltan por tomar algunas decisiones para la optimización total de los diseños, por lo que en este apartado no se va a tener en cuenta el coste del material empleado. Como se ha visto anteriormente, en el futuro habrá que decidir con qué material se construye el diseño debido a las ventajas y desventajas que presentan cada una de las posibilidades.

Es por ello que los costes quedan resumidos en dos grupos, el coste de la mano de obra y los relacionados con las licencias de software y equipo utilizado [23], los cuales se desglosan a continuación.

7.2 Licencias de software y equipo.

Para el desarrollo del presente trabajo se han empleado dos software, uno de ellos para el diseño CAD y otro para las simulaciones numéricas, SolidWorks e Hyperworks respectivamente. Además se ha adquirido un ordenador portátil para poder realizar las diferentes operaciones de diseño y simulación.

A continuación se presenta de forma tabulada el coste de estas licencias y equipo en el proyecto.

Tabla 15. Costes generados por licencias y equipo

Concepto	Tipo	Coste unitario	Amortización anual	Coste imputado al proyecto (15 semanas)
Licencias Software	SolidWorks 2019	410€/3meses	0 €	410 €
	HyperWorks (licencia estudiante)	0 €	0 €	0 €
	Microsoft Office 2013	99€/año	0 €	99 €
Ordenador	MSI GL 63 8RD	1200	300 €	86,54 €
			Total	595,54 €

El coste de adquisición del ordenador es el único que sufre una amortización. Se estima la vida útil de éste en 4 años. Se amortizará durante las quince semanas que dura el proyecto.

7.3 Coste mano de obra.

En la siguiente tabla se recoge un resumen de las horas dedicadas para este proyecto.

Tabla 16. Horas dedicadas al proyecto desglosadas por semanas.

	Mes	Febrero		Marzo				Abril				Mayo					Total
	Semana	S1 (18-24)	S2(25-03)	S3(04-10)	S5(11-17)	S6(18-24)	S6(25-31)	S7(01-07)	S8(08-14)	S9(15-21)	S10(22-28)	S11(29-05)	S12(06-12)	S13(13-19)	S14(20-26)	S15(27-02)	
Diseño	Documentación	12h	20h	9h													41h
	Formación			10h	17h	6h											33h
	Diseños					13h	18h	16h	7h								54h
Simulación	Formación									9h	23h	15h					47h
	Simulaciones												28h	15h	21h	10h	74h
Redacción del informe														20h	25h	35h	80h
																	329h

El apartado de documentación dentro de diseño hace referencia a todo el trabajo de búsqueda sobre normativa y la información necesaria para la estimación de las medidas de la cuerda y la envergadura que se ha explicado anteriormente. Las horas dedicadas a la formación con ambos programas ha sido el tiempo necesario para adquirir las habilidades necesarias para poder realizar los diseños y las simulaciones.

Las horas totales dedicadas a este proyecto han sido 329h. El proyecto ha sido llevado a cabo por un solo ingeniero, por lo que el coste de la mano de obra se calcula multiplicando las horas por el precio de hora trabajada.

Tabla 17. Coste mano de obra

Tipo Mano de obra	Cantidad (horas)	Coste unitario (€/h)	Coste total
Ingenieril	329	12,00	3948€

7.4 Presupuesto total del proyecto.

Teniendo en cuenta los costes calculados en los anteriores apartados, el coste total resultante de este proyecto es 4543,54€.

Tabla 18. Costes totales.

Tipo de coste	Coste Total
Licencias y equipo	595,54€
Mano de obra	3948€
	4543,54€

Capítulo 8. Conclusiones y trabajos futuros

8.1 Resumen y conclusiones.

A lo largo del presente trabajo se han realizado distintos modelos de alerón que han ido sufriendo modificaciones y mejoras con el desarrollo de los siguientes modelos.

El primer diseño ha sido el más simple de los cuatro. Con éste se buscaba imponer un punto de partida y comprobar con el análisis estructural en que zonas se alcanzaban las máximas tensiones y el valor del desplazamiento máximo. Al ser un diseño simple, se suponía que iba a cumplir las condiciones de diseño y del reglamento pero era importante comprobarlo para partir desde un diseño correcto.

Durante el diseño de todos los modelos, el objetivo principal ha sido la reducción del peso, ya que como se ha comentado durante el desarrollo del trabajo, un menor peso va a generar la necesidad de menores fuerzas de empuje o lo que es lo mismo mayor velocidad para la misma fuerza.

Tras el diseño y la posterior simulación de los distintos modelos se ha obtenido como resultado un alerón con un peso final de 18,532Kg. Para este modelo se ha comprobado que tras imponer las cargas marcadas por el reglamento en diferentes puntos del alerón el desplazamiento vertical máximo es de 3,854mm. Este valor es muy inferior a los 10mm que son marcados por la FIA como desplazamiento máximo permitido.

Tras el análisis de los resultados, se ha llegado a la conclusión de que no es el modelo más óptimo que se podría haber creado, ya que los resultados se encuentran lejanos sus respectivos valores límite, sin embargo para ser un diseño preliminar son resultados aceptables y posibles puntos de inicio para futuros trabajos.

A partir del análisis estructural realizado se extrajeron las siguientes conclusiones:

- La zona donde se producen las mayores tensiones en todos los modelos ha sido alrededor de los apoyos. Esto es debido a que justamente en esos puntos es donde se está impidiendo el movimiento, creado zonas de concentradores de tensiones.
- Se ha comprobado que la idea de un alerón con costillas, imitando el diseño del ala de una aeronave, no es la mejor para el diseño de un alerón. Tras comparar los resultados del modelo con costillas y sin costillas y viendo los valores tan próximos, se ha llegado a la conclusión de que esta proximidad es debida a las

dimensiones del alerón, teniendo una envergadura total de 1,78m frente a los 10-15m que suele tener una aeronave de recreo como podría ser la cessna 210. Además, el diseño hueco facilita considerablemente el futuro montaje del mismo.

- También se ha concluido que en el caso de usar costillas, no recomendable como se ha visto, es conveniente que éstas estén situadas, a medida de lo posible, sobre los soportes verticales. De esta forma se elimina la zona de concentración de tensiones alrededor de éstas.
- El diseño de un alerón hueco y unos soportes a los que se les ha realizado unos vaciados para reducir el peso, aportan menor rigidez al conjunto generando mayor desplazamiento y tensiones más grandes que el primer modelo, sin embargo estos resultados son aceptables ya que cumplen con el reglamento y la estructura se comporta en régimen elástico durante la aplicación de las cargas.

Con esta comparativa se quiere expresar que dependiendo de la estructura que se esté analizando los requerimientos son distintos, en este caso vale la pena penalizar ligeramente el desplazamiento y las tensiones, siempre dentro de los límites correctos, con el objetivo de reducir el peso.

- Como se ha podido observar en el apartado 6.7 el uso de materiales compuestos reduce considerablemente el peso de la estructura conservando las propiedades mecánicas. El mismo modelo diseñado en fibra de carbono tiene un peso total de 10.053kg frente a los 16,62Kg del modelo en aluminio. Esto supone una reducción del 36.5% del peso total al pasar del metal al material compuesto. Para este modelo, los resultados obtenidos también se encuentran lejanos a sus valores límites, esto es debido a que las dimensiones de las capas de fibra han sido diseñadas con el objetivo de que coincidieran con el mismo espesor que el modelo de aluminio, por lo que no es un diseño que esté optimizado. El espesor de las capas se podría reducir considerablemente lo que provocaría una notable disminución del peso.

8.2 Trabajos futuros.

Como se ha comentado en numerosas ocasiones, el objetivo de este trabajo consistía en el diseño preliminar del alerón de un vehículo deportivo. Como consecuencia se presentan a continuación algunas de las líneas de estudio que se pueden desarrollar tomando como punto de partida el presente trabajo. Algunas de ellas se deben tratar con detalle ya que han impedido desarrollar ciertas ideas debido a su complejidad, la cual requiere un estudio exclusivo.

- Como se ha comentado en el punto 2.2 la incorporación del alerón trasero es una de las muchas variaciones que sufre un vehículo convencional para poder competir, por lo que se podría estudiar más en detalle los diferentes cambios explicados en dicho punto.
- En el apartado del diseño, se ha comentado que los end plates no se habían diseñado debido a la necesidad del estudio aerodinámico, por lo que dicho estudio habría que realizarlo para completar el conjunto del alerón. Con dicho estudio se podría calcular la geometría y dimensiones de éstos.
- El modelo de fibra de carbono se ha realizado como una breve introducción al material compuesto y para comprobar la reducción del peso al utilizar este tipo de materiales. Por ello se podría realizar una optimización del mismo para determinar distintos espesores de capa dependiendo de las zonas en función de las tensiones generadas en cada una de ellas.
- El problema principal de la fibra de carbono es el método de unión del ala con los soportes verticales ya que hay que encontrar el método de unión entre la fibra y el metal. Esta problemática se podría estudiar en detalle en un futuro.
- En la actualidad existen mejoras tecnológicas que permiten modificar la inclinación del alerón para generar mayor carga aerodinámica en las zonas del circuito que así se requiera como son los pasos por curva. Esta tecnología podría ser implantado en el modelo desarrollado en este trabajo.
- Por último, para poder montar el diseño en el vehículo habría que plantear el método de fabricación de los modelos dependiendo del material utilizado. Para ambas opciones existen diferentes métodos los cuales se deberían analizar detalladamente.

Bibliografía

- [1] M. Alegría, «AUTOS RPM,» 03 05 2018. [En línea]. Available: <http://www.autosrpm.com/actualidad/estas-las-diferencias-entre-un-auto-de-carreras-y-uno-de-calle/>.
- [2] FIA. [En línea]. Available: <https://www.fia.com/>.
- [3] F. Sancho, «motor.es,» 14 02 2018. [En línea]. Available: <https://www.motor.es/noticias/categorias-wec-24-horas-le-mans-dummies-201844046.html>.
- [4] FIA, «Technical Regulations for Production Sports Cars (Group CN),» [En línea].
- [5] FIA/ACO Sport / Technical Department, 07 03 2019. [En línea]. Available: https://www.fia.com/regulations/search?search_api_views_fulltext=GT+WING. [Último acceso: 21 Marzo 2019].
- [6] «BlancPain GT Series,» [En línea]. Available: <https://www.blancpain-gt-series.com/cars>.
- [7] «BlancPain GT Series,» [En línea]. Available: <https://www.blancpain-gt-series.com/calendar>.
- [8] División de Formación aeronáutica, de *Curso de entrenamiento dinicial de tripulante de cabina de pasajeros*, 2018, pp. 217-219.
- [9] D. Simanaitis, «SimanaitisSays,» 2015. [En línea]. Available: <https://27vueltas.wordpress.com/2013/09/05/chaparral-cars-el-genio-de-jim-hall-parte-3-los-experimentos-y-final/>.
- [10] Guilleneuve, «27 Vueltas,» 05 Septiembre 2013. [En línea]. Available: <https://27vueltas.wordpress.com/2013/09/05/chaparral-cars-el-genio-de-jim-hall-parte-3-los-experimentos-y-final/>.
- [11] S. May, «NASA,» 04 Junio 2011. [En línea]. Available: <https://www.nasa.gov/audience/forstudents/k-4/stories/nasa-knows/what-is-aerodynamics-k4.html>.
- [12] N. Hall, «NASA,» 2015 05 05. [En línea]. Available: <https://www.grc.nasa.gov/WWW/K-12/airplane/bern.html>. [Último acceso: 15 Marzo 2019].
- [13] E-ducative, [En línea]. Available: http://e-ducative.catedu.es/44700165/aula/archivos/repositorio/4750/4918/html/22_ecuacin_de_continuidad.html. [Último acceso: 15 Marzo 2019].
- [14] Ecured, [En línea]. Available: https://www.ecured.cu/Efecto_Venturi. [Último acceso: 03 15 2019].
- [15] Audi España, [En línea]. Available: <https://www.audi.es/es/web/es/modelos/tt/tt-coupe.html#>. [Último acceso: 06 Marzo 2019].

- [16] R. E. C. López, «Diseño de un alerón de un vehículo de competición: comparación de la simulación aerodinámica numérica y la simulación aerodinámica experimental.,» Castelldefels, 2008.
- [17] Porsche España, [En línea]. Available: <https://www.porsche.com/spain/models/911/911-gt3-models/911-gt3-rs/>. [Último acceso: 06 Marzo 2019].
- [18] [En línea]. Available: <https://grabcad.com/mahmut.mancar-1>. [Último acceso: 19 Abril 2019].
- [19] E. F. Valero, «Aportaciones al estudio de las máquinas eléctricas de flujo axial mediante la aplicación del método de los elementos finitos.,» 2004.
- [20] MakeItFrom, [En línea]. Available: <https://www.makeitfrom.com/compare/6061-T4-Aluminum/6061-T6-Aluminum>.
- [21] B. L. B. PÉREZ, «COMPORTAMIENTO DE ESTRUCTURAS DE MATERIAL COMPUESTO SOMETIDAS A CARGAS IMPULSIVAS,» Leganés, 2012.
- [22] C. H. Santos, «ESTUDIO DEL FALLO EN UNIONES ADHESIVAS CON MATERIALES COMPUESTOS,» Mayo 2013. [En línea]. Available: http://bibing.us.es/proyectos/abreproy/60156/fichero/VOLUMEN+1%252FPFC_CarlosHerrera.pdf. [Último acceso: 26 Mayo 2019].
- [23] CIMWORKS, [En línea]. Available: <https://www.cimworks.es/precios-solidworks/>. [Último acceso: 25 Mayo 2019].
- [24] T. Krause, «WEC MAGAZIN,» 2016. [En línea]. Available: <https://wec-magazin.com/features/history-of-the-wec/>.

Anexo 1.

Tabla de datos

Coordenadas XYZ del perfil aerodinámico Ch10. 300mm de cuerda.

X(mm)	Y(mm)	Z(mm)
300	-0.015	0
299.262	-0.507	0
297.21	-1.737	0
294.111	-3.333	0
290.094	-5.163	0
285.132	-7.356	0
279.192	-9.951	0
272.325	-12.876	0
264.606	-16.101	0
256.11	-19.566	0
246.927	-23.175	0
237.144	-26.826	0
226.848	-30.429	0
216.129	-33.894	0
205.077	-37.152	0
193.782	-40.122	0
182.334	-42.729	0
170.811	-44.91	0
159.297	-46.614	0
147.795	-47.826	0
136.305	-48.528	0
124.914	-48.72	0
113.661	-48.399	0
102.612	-47.586	0
91.827	-46.302	0
81.36	-44.577	0
71.28	-42.444	0
61.647	-39.93	0
52.512	-37.065	0
43.944	-33.873	0
35.997	-30.396	0
28.728	-26.688	0
22.185	-22.833	0
16.404	-18.936	0
11.433	-15.096	0

7.299	-11.379	0
4.014	-7.845	0
1.644	-4.593	0
0.294	-1.758	0
0	-0.042	0
0.294	1.35	0
1.644	2.742	0
4.014	3.537	0
7.299	3.807	0
11.433	3.627	0
16.404	3.084	0
22.185	2.277	0
28.728	1.305	0
35.997	0.228	0
43.944	-0.96	0
52.512	-2.244	0
61.647	-3.603	0
71.28	-5.001	0
81.36	-6.408	0
91.827	-7.791	0
102.612	-9.12	0
113.661	-10.371	0
124.914	-11.517	0
136.305	-12.534	0
147.795	-13.398	0
159.297	-14.079	0
170.811	-14.553	0
182.334	-14.799	0
193.782	-14.796	0
205.077	-14.535	0
216.129	-14.016	0
226.848	-13.269	0
237.144	-12.324	0
246.927	-11.217	0
256.11	-9.966	0
264.606	-8.601	0
272.325	-7.158	0
279.192	-5.688	0
285.132	-4.23	0
290.094	-2.808	0
294.111	-1.548	0
297.21	-0.636	0
299.262	-0.132	0
300	0.018	0

Anexo 2

A continuación se presentan los planos del modelo cuatro, expuesto en el punto 4.6, con el objetivo de indicar las dimensiones de éste.

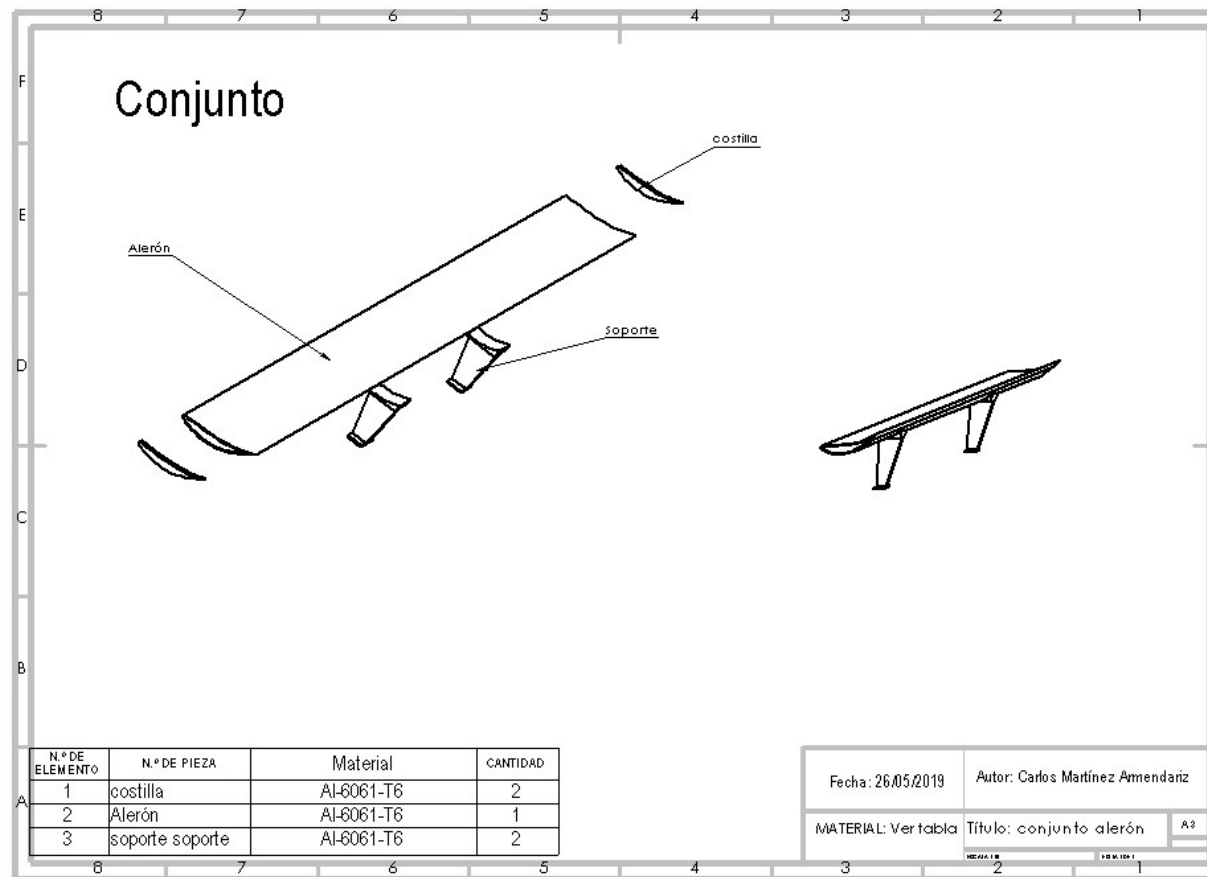


Figura 74. Plano conjunto alerón.

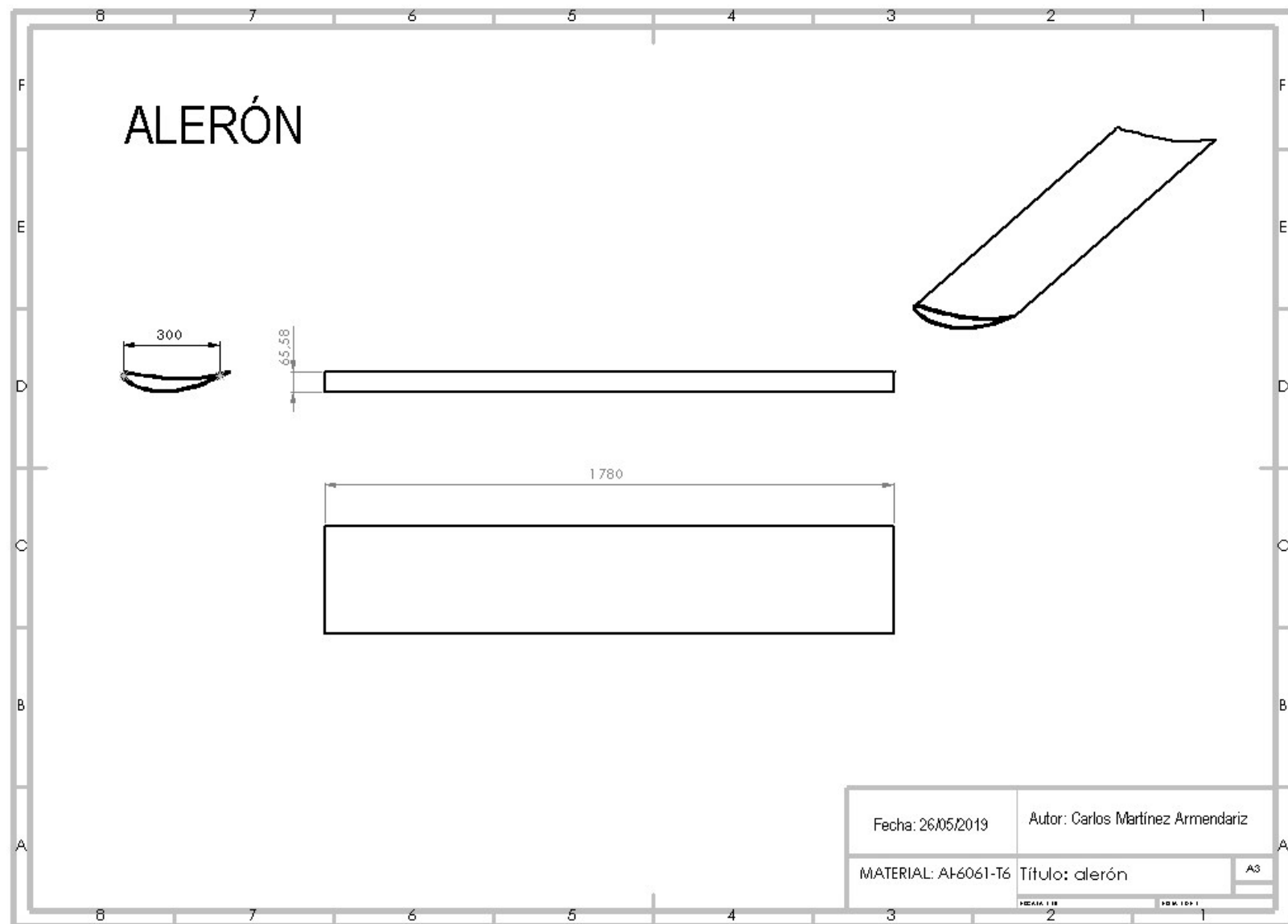


Figura 75. Plano alerón.

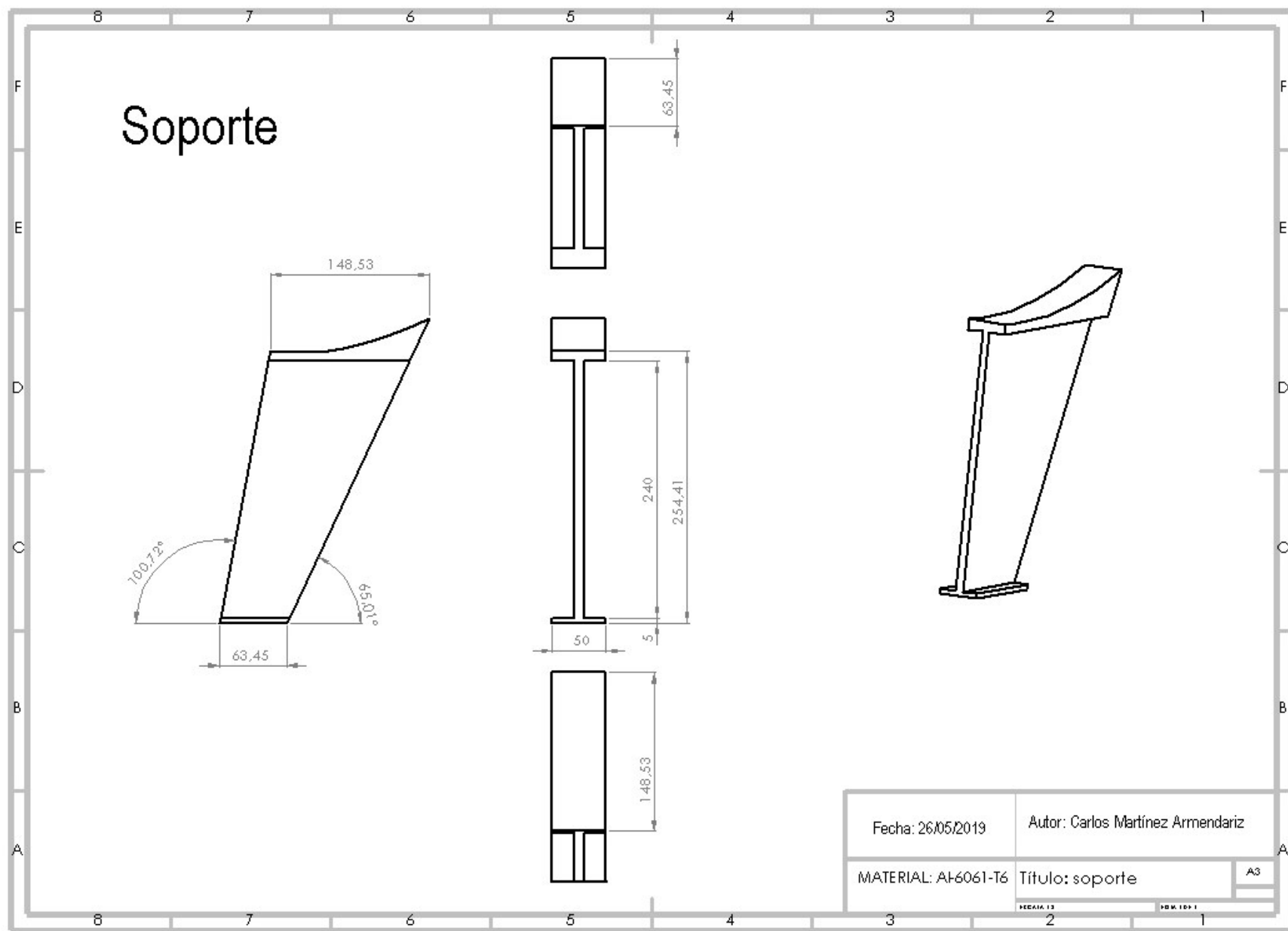


Figura 76. Plano soporte.

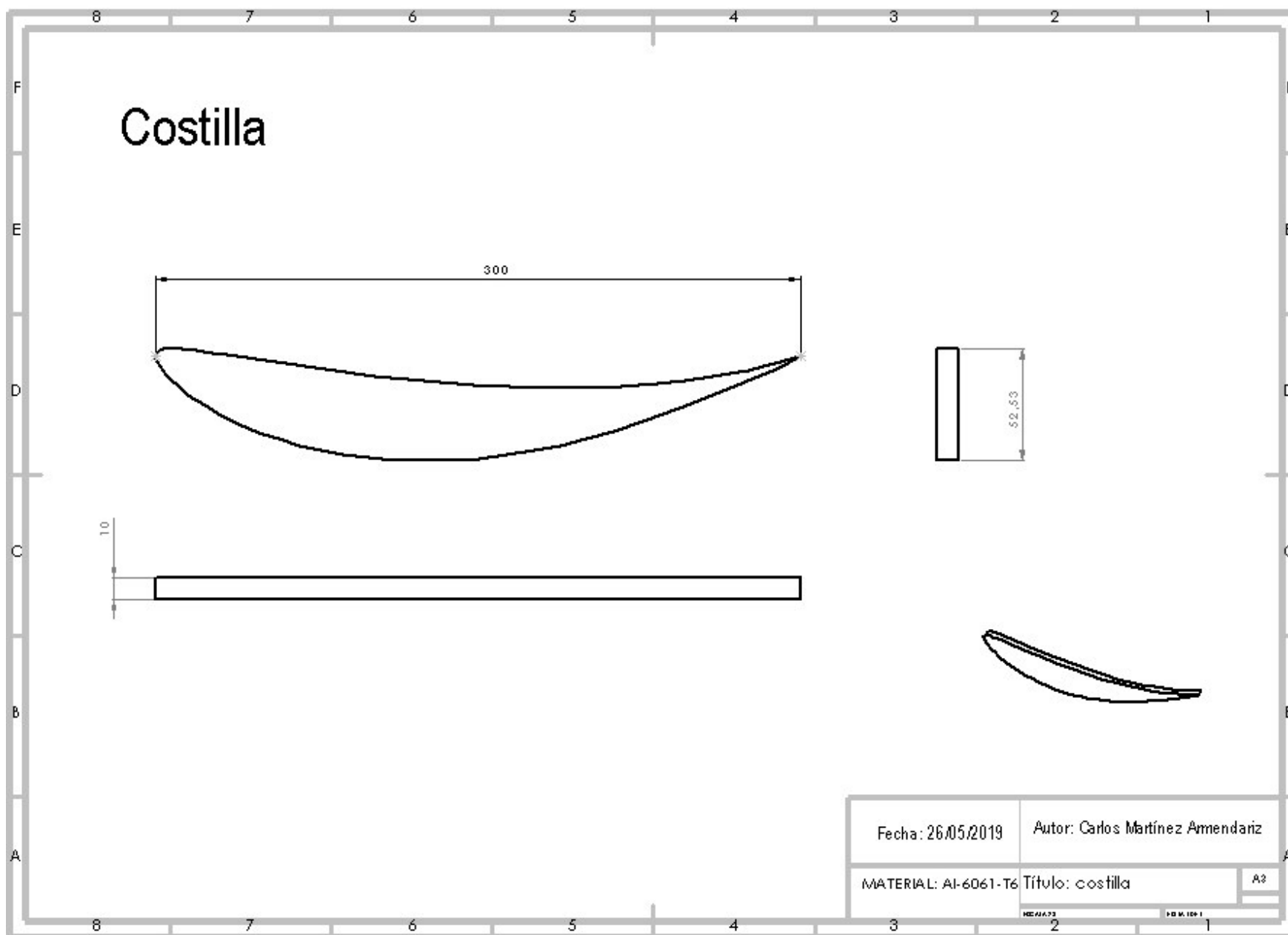


Figura 77. Plano costilla.